

Wenzel

H. J. Wenzel



Digitized by the Internet Archive
in 2026

https://archive.org/details/IA41554222_0040

Aus der Prothetischen Abteilung
(Leiter: Prof. Dr. Fr. Jung)
der Klinik und Poliklinik für Zahn-, Mund- und Kieferkrankheiten
(Direktor: Prof. Dr. Dr. M. Herrmann)
der Johannes Gutenberg-Universität zu Mainz

ÜBER DIE ÄNDERUNG DES ELASTISCHEN VERHALTENS
EINER ZAHNWURZEL
DURCH DAS EINFÜGEN EINES WURZELSTIFTES

Inaugural-Dissertation
zur Erlangung der Doktorwürde einer Hohen Medizinischen Fakultät
der Johannes Gutenberg-Universität zu Mainz

vorgelegt von

HANS JÜRGEN WENZEL

Zahnarzt aus Duisburg-Hamborn

MAINZ 1961

Referent: Professor Dr. Fritz Jung

Dekan: Professor Dr. Dr. Martin Herrmann

Tag der mündlichen Prüfung: 23.11.1960

Datum des Diploms: 23. Nov. 1960



GESAMTHERSTELLUNG:

DITTERS BÜRODIENST, MAINZ, Augustinerstraße 64-66

INHALT

	Seite
I. Einleitung und Literaturbesprechung	1
II. Erläuterungen zum Thema der Arbeit	2
III. Physikalische Gesetzmäßigkeiten und Definitionen	3
IV. Unterschiede zwischen praktischem Fall und physikalischer Betrachtung	10
V. Beschreibung der Versuche	11
a) Auswahl der Zähne	11
b) Behandlung der Zähne vor und während der Messungen	12
c) Erläuterungen zum Meßvorgang	13
d) Beschreibung der Apparatur	13
1. Die Presse	13
2. Die Meßvorrichtung	13
3. Meßgenauigkeit	14
4. Andere Möglichkeiten, die Deformationen zu messen ..	15
5. Die Einspannvorrichtung	15
6. Die Belastungsvorrichtung	17
VI. Meßergebnisse und Auswertung:	19
VII. Zur Auswertung	29
VIII. Zusammenfassung	36
Literaturhinweise	39

I. EINLEITUNG UND LITERATURBESPRECHUNG

Im physiologischen Geschehen bedeutet die Nahrungsaufnahme einen wichtigen Vorgang, zu dem die Kiefermuskulatur erhebliche Kräfte aufbieten muß. Und doch entsprechen die normalerweise ausgeübten Kaukräfte nur einem Teil der absoluten Muskelkraft. Wäre doch nach Fick die Kaumuskulatur mit einem physiologischen Muskelquerschnitt von 40 cm^2 imstande, eine Kraft von 400 Kilopond zu entwickeln. Wenn diese Kraft auch nie ungehemmt auf Nahrungsbrocken einwirkt, so können doch Zähne unter unphysiologischen Bedingungen, wie es z. B. beim nächtlichen Knirschen und Pressen der Fall ist, auf einer Kieferseite mit 160 kp zusammengepreßt werden.

Es ist gut zu verstehen, daß ein mechanisches System von der Größe der menschlichen Kiefer bei so gewaltigen Belastungen verformt wird. Aber auch schon geringere Belastungen, das normale Kauen und die dauernden unbewußten Bewegungen des Unterkiefers, wie sie besonders beim Verrichten einer schweren Arbeit deutlich werden, genügen, um meßbare Deformationen des gesamten Zahnes, des Parodontiums und der Kieferknochen herbeizuführen.

Rauber hat schon 1867 auf die elastische Deformierbarkeit des Knochens hingewiesen.

Black erkannte die Bedeutung der elastischen Deformation, die das Dentin beim Ausfüllen von Kavitäten mit kohäsivem Gold erfährt, für den Randschluß von Füllungen. Seither sind immer wieder Arbeiten erschienen, in denen sich die Verfasser mit grundsätzlichen Fragen zu den auf das menschliche Gebiß einwirkenden Kräften und zu ihrer Wirkung auf Zähne und Kiefer auseinandersetzen.

Mühlemann beschrieb Untersuchungen an 200 Zähnen, die in vivo einwandfrei die Gesetzmäßigkeiten der Beweglichkeit des Zahnes in seiner Alveole nachweisen.

Driak untersuchte in vitro Zähne mit und ohne Füllungen auf ihre Zusammendrückbarkeit, die er mit Hilfe eines Mikroskopes auch messen konnte.

Jung und seine Schüler befaßten sich in einer Reihe von Arbeiten mit den elastischen Deformationen, die das Gebiß und sein Fundament unter der Wirkung der Muskelkräfte erleiden.

So beschrieb Jung die Elastizität der Mandibula bei der Bißöffnungsbewegung, Gettmann stellte die gleichen Versuche mit der kindlichen Mandibula an.

Job untersuchte die elastische Deformation der Kiefer bei der mastikatorischen Funktion.

Schmitt untersuchte elastische Deformationen des Kronendentins. Dazu trieb er Keile in präparierte Kavitäten von Prämolaren und Molaren. Der Elastizitätsmodul ließ sich aus der dazu benötigten Kraft und der Abstandsänderung der Kavitätenwände errechnen.

Sauer bewies an extrahierten Zähnen, daß ein Zahn unter Belastung durch extraaxiale Kräfte verbogen wird. Diese Verbiegung ist reversibel und gehorcht über längere Strecken hinweg dem Hookes'schen Elastizitätsgesetz.

II. ERLÄUTERUNGEN ZUM THEMA DER ARBEIT

An die Sauer'schen Untersuchungen soll die vorliegende Arbeit anknüpfen.

Die Wurzel eines Zahnes wird vom Wurzelkanal durchzogen. Sie stellt somit annähernd ein Rohr dar, das aus elastischem Material besteht. Es ist eingespannt in das elastische Parodontium und damit in den elastischen Knochen.

Betrachten wir nur die Wirkung, die durch extraaxiale Kräfte auf dieses System ausgeübt wird, so wird sich nach Mühlemann der Zahn zunächst in der Alveole bewegen. Wenn die Nachgiebigkeit des Parodontiums erschöpft ist, hat die Alveole schon begonnen, sich der einwirkenden Kraft entsprechend zu verformen. Der Zahn bewegt sich also anfangs in der Alveole, dann mit der Alveole, schließlich mit dem ganzen Alveolarfortsatz. Allmählich beginnt sich der Zahn bei weiterer Belastung elastisch zu deformieren, wobei allerdings unter normalen Bedingungen der Schmerz der Belastungsmöglichkeit bald eine Grenze setzt. Immerhin sind auch schon bei 1,5 bis 2 kp Belastung - eben der Schmerzgrenze - deutlich im Experiment meßbare Deformationen eingetreten. Sauer's Messungen zeigen dieses ebenso wie die eigenen Untersuchungen.

Unter unphysiologischen Belastungen, beim unerwarteten Aufbeißen auf einen harten Gegenstand in der Nahrung oder bei dem schon erwähnten nächtlichen Knirschen, nehmen diese Deformationen recht beachtliche Ausmaße an.

Der Zahn ist also in ein nachgiebiges System eingebettet, das nacheinander alle Möglichkeiten ausschöpft, Kräfte aufzunehmen. Dabei ergänzen sich diese Ausweichmöglichkeiten in wohlausgewogener Weise, ohne daß durch Überlastung eines Teiles Schäden auftreten.

Soweit die Verhältnisse im gesunden Gebiß.

Wird eine Veränderung dieses Systems durch zahnärztliche Maßnahmen wesent-

liche Störungen mit sich bringen? Solche Störungen in der Funktion des Zahnes könnten sich als Beeinträchtigung des Zahnhalteapparates oder sogar als Frakturen auswirken.

In dieser Arbeit sollen Versuche beschrieben werden, die angestellt wurden, um nachzuprüfen, ob das Einfügen eines Wurzelstiftes zu Veränderungen der elastischen Deformierbarkeit führt. Man wählt bekanntlich diese Verankerungsmöglichkeit zum Befestigen von Kronen, Brücken oder Ersatz größerer Defekte der natürlichen Krone bei pulpentoten Zähnen. Starke Veränderungen des elastischen Verhaltens ließen dann auch Schäden zumindest an stark beanspruchten Zähnen - Eckzähnen, umklammerten Zähnen, Brückenpfeilern - erwarten.

Bleiben solche Schäden am Zahn selbst und an seiner Alveole aus, so kann es auch bei starker Beeinflussung des elastischen Verhaltens der Wurzel durch den Stift zu Lockerungen oder Bruch des Stiftes und damit natürlich zum Lösen der ganzen künstlichen Krone kommen.

Das Mißtrauen, das oft der Patient dem Stiftkronenersatz entgegenbringt, wäre dann berechtigt.

Es soll hier nicht verkannt werden, daß der Ersatz der ganzen natürlichen Krone wesentlich höhere Anforderungen an seine Befestigung stellt als der Ersatz nur des Schmelzmantels durch die Hülsenkrone. Der Stiftkronenersatz als die weitergehende Möglichkeit zum Aufbau eines zerstörten Zahnes ist von vornherein schwieriger und wird daher einer schärferen Kritik seiner Indikation und Konstruktion unterworfen sein.

In der vorliegenden Arbeit soll geprüft werden, ob der schlechte Ruf der Stiftkrone zum Teil auch durch die Elastizitätsänderung beim Einfügen des Wurzelstiftes bedingt ist.

III. PHYSIKALISCHE GESETZMÄSSIGKEITEN UND DEFINITIONEN

Es sollen zunächst einmal die physikalischen Gesetzmäßigkeiten betrachtet werden, die den später zu beschreibenden Versuchen zugrunde liegen.

Unter einer elastischen Deformation versteht man die reversible Formveränderung eines festen Körpers, die dieser durch Einwirkung einer Kraft erfährt, wobei unterhalb der Fließgrenze Proportionalität zwischen Kraft und Verformung besteht (Hookes'sches Gesetz).

Die Verformung bei einer bestimmten Kraft ist abhängig von der Länge der zu verformenden Strecke. Beim Strecken eines Prismas durch eine Kraft parallel zu einer Grenzfläche ist die Dehnung ϵ gleich der Längenänderung dividiert durch seine Länge:

$$\epsilon = \frac{l' - l}{l} \quad (1)$$

Der Flächeninhalt eines zur Kraftrichtung senkrecht stehenden Querschnitts beeinflusst das Ausmaß der Dehnung. Als Spannung σ bezeichnet man den Quotienten aus einwirkender Kraft P und Querschnittsfläche F:

$$\sigma = \frac{P}{F}$$

Wirkt die Kraft in beliebiger Richtung oder nicht gleichmäßig auf eine ganze Angriffsfläche ein, so daß sie verbiegt oder schert, so müssen alle infinitesimalen Querschnittselemente getrennt betrachtet werden.

Der Proportionalitätsfaktor zwischen Dehnung und Spannung ist u. a. abhängig vom Material. Er heißt Elastizitätsmodul E.

$$\sigma = E \epsilon \quad (2)$$

Ist die Dehnung bei einer bestimmten Spannung σ groß, so ist der Elastizitätsmodul klein; ein Körper also, der leicht dehnbar ist, z. B. Weichgummi, hat einen kleinen Elastizitätsmodul. Bei Stahl hingegen ist er sehr groß, Stahl verformt sich eben wenig bei geringen Kräften.

Erwähnt seien hier noch die elastische Nachwirkung und die elastische Hysterese. Nach Pohl sind dies zwei Größen, die im Hookes'schen Gesetz nicht berücksichtigt sind. Die elastische Nachwirkung einer Kraft ist der Verformungsrückstand, der abhängig von der Zeit bestehen bleibt, wenn die Belastung abgesetzt wird. Dabei scheint potentielle Energie verloren zu gehen. Sie wird ausgedrückt als Produkt von Kraft und Wegrückstand. Sie bleibt beim Absetzen der Belastung zunächst im noch verformten Körper zurück, wird aber allmählich im Laufe von Minuten durch weiteres Zurückbiegen wiedergewonnen.

Anders bei der elastischen Hysterese. Diese wird in einem Verformungsrückstand erkennbar, der erst nach Einwirken einer umgekehrt wirkenden Kraft beseitigt wird. Die potentielle Energie geht also bei der Hysterese verloren, sie kommt als Wärme zum Vorschein.

Natürlich kann man diese beiden Erscheinungen schlecht von einer möglicherweise eingetretenen plastischen Verformung trennen.

Die elastische Nachwirkung und ihre ähnlich zum Ausdruck kommenden Schwestererscheinungen sind hier angeführt, weil man beim Beschreiben der elastischen Eigenschaften des Dentins eine Einschränkung machen muß: Das Dentin weist eine sehr starke elastische Nachwirkung auf, wie auch schon von Black und Driak beobachtet wurde.

Die Prüfungen der elastischen Eigenschaften des Dentins ergaben, daß die elastische Nachwirkung etwa der Größenordnung der Verformung entsprach. Sie verschwand bis auf unmeßbar geringe Reste - Hysterese oder plastische Verformung - innerhalb weniger Minuten.

Bei der Messung der Elastizitätsänderung von Zahnwurzeln wird eine Verbiegung durch eine Kraft gemessen, die im rechten Winkel zur Hauptausdehnungsrichtung des Meßkörpers einwirkt.

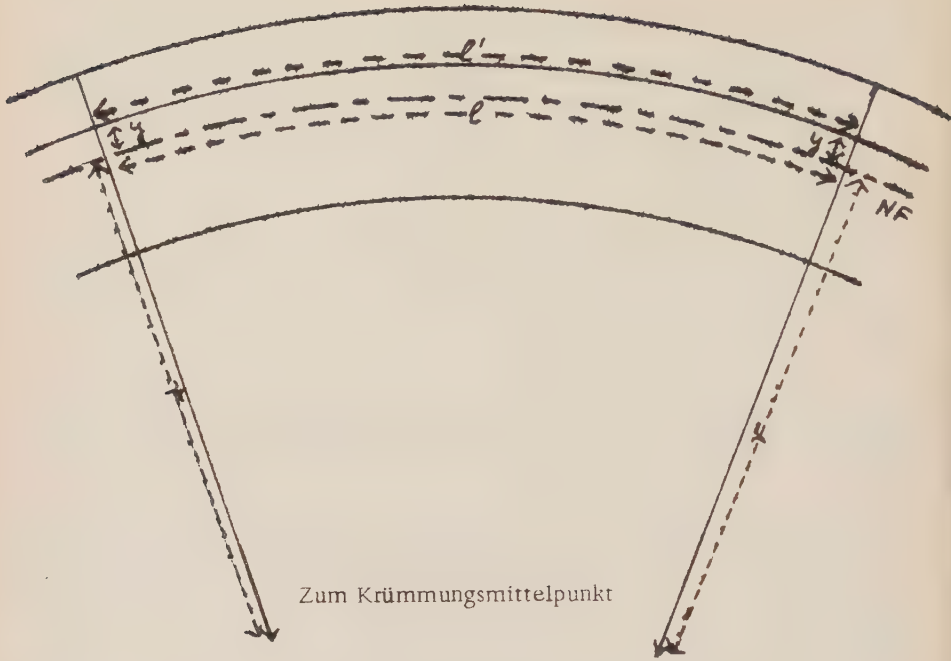
Die Kraft greift hierbei nicht an allen Punkten eines Längsschnittes durch die Wurzel gleichmäßig an; sie komprimiert oder expandiert den Körper also nicht. Vielmehr wird der Körper durch die auf einen Punkt einwirkende Kraft verbogen. Wir müssen, wie schon erwähnt, alle in ihrer Länge veränderten Querschnittselemente und die auf sie wirkenden Kräfte betrachten.

Nach Pohl sei nur der ebene Spannungszustand berücksichtigt, was bei der Kleinheit der Deformation berechtigt erscheint. Eine Einschnürung oder Wölbung - also Veränderung von Querschnittsform und -größe -, die unter der verbiegenden Kraft entstehen, sollen vernachlässigt werden.

Weiter werde ein Körper mit einem auf seiner ganzen Länge gleichen und gleichgroßen Querschnitt betrachtet, also ein Zylinder.

Dieser Zylinder werde so verformt, daß sein Längsschnitt einen Kreisbogen bildet. Wir erhalten in der Mitte des Querschnitts eine "neutrale Faser". Dies ist ein flächenhaftes Element, das, unendlich dünn, nur gebogen, aber nicht in seiner Länge verändert wird. Es verläuft so durch den Körper, daß die Tangente in jedem Punkt senkrecht zu dem dazugehörigen Krümmungsradius steht.

Die dem Krümmungsmittelpunkt abgewandte Hälfte eines jeden Querschnitts wird gestreckt, die andere Hälfte gestaucht.



Wegen der Proportionalität zwischen Kreisbogen und Radius gilt (nach Pohl):

$$\frac{r + y}{r} = \frac{l'}{l} \quad (3)$$

Die schon definierte Dehnung ist:

$$\epsilon = \frac{l' - l}{l} \quad (1)$$

Diese Dehnung wird hervorgerufen durch die Spannung

$$\sigma = E \epsilon \quad (2)$$

Daraus folgt:

$$\sigma = E \frac{l' - l}{l};$$

Da aber

$$r (l' - l) = y l \quad (\text{aus 3})$$

$$\frac{l' - l}{l} = \frac{y}{r}, \quad (4)$$

folgt:

$$\sigma = E \frac{y}{r}. \quad (\text{aus 2, 4}) \quad (5)$$

Dies gilt für ein beliebiges Querschnittselement im Abstand y von der neutralen Faser, wobei die positive Richtung zentrifugal definiert sei.

Summiert man über alle Querschnittselemente die darauf jeweils einwirkenden Spannungen und multipliziert sie mit dem jeweiligen Hebelarm bezogen auf die neutrale Faser, so erhalten wir das Gesamtdrehmoment, das der Körper seiner Verbiegung entgegensetzt. Es ist also mit anderen Worten das Moment, das nötig ist, um zwei parallel stehende Querschnitte des Körpers in ihrer Lage so zu verändern, daß sie einen Winkel miteinander bilden.

$$\mathcal{M} = \int \sigma \, dF \, y$$

σ aus (5) eingesetzt ergibt:

$$\mathcal{M} = \int E \frac{y^2}{r} \, dF.$$

Zieht man die unabhängigen Größen aus dem Integral heraus, so bekommt man:

$$\mathcal{M} = \frac{E}{r} \int y^2 \, dF \quad (6)$$

Dabei wird der Ausdruck

$$J = \int y^2 \, dF$$

"Flächenträgheitsmoment" genannt, weil er analog dem Ausdruck des Trägheitsmomentes bei Drehbewegungen gebildet ist.

Für den Fall des Kreisringes ergibt dieser Ausdruck:

$$J = \frac{\pi}{4} (R^4 - r^4).$$

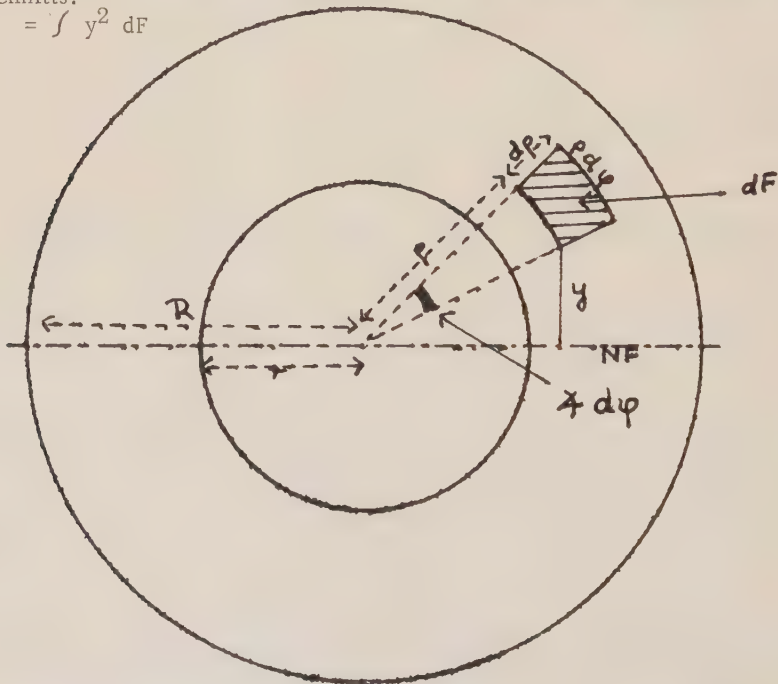
Wird in diesem Ausdruck der Radius der Rohrleitung r zu Null, so wird das Flächenträgheitsmoment seinen größten Wert annehmen. Das bedeutet: es findet eine Verfestigung statt, wenn man das Lumen eines Rohres ausfüllt. Das geschieht, wenn man den Wurzelkanal mit einem Stift verschließt.

Im vorliegenden Fall wird allerdings die Verfestigung sehr gering bleiben, weil r höchstens 1 mm wird. Damit wird der zweite Summand im Ausdruck für das Flächenträgheitsmoment höchstens $\frac{\pi}{4}$, also kleiner als 1; ist der Wurzelstift dünner als 2 mm, wird der zweite Summand noch einmal kleiner, weil r ja in der vierten Potenz eingeht und damit den Ausdruck sehr viel weniger beeinflußt als R , das mehrere Millimeter groß ist, und damit beim Erheben in die vierte Potenz recht beachtliche Werte annimmt.

Die klinische Erfahrung lehrt, daß diese befürchtete Verfestigung, die zu größerer Belastung von Zahnhalteapparat und Knochen mit allen bekannten nachteiligen Folgen führen könnte, offenbar nur unerheblich ist. Damit bestätigt die klinische Erfahrung schon die theoretische Betrachtung, deren Gültigkeit noch durchs Experiment zu beweisen wäre.

Anhang: Auflösung des Integrals für den Fall des kreisringförmigen Querschnitts:

$$J = \int y^2 dF$$



Laut obiger Skizze ist für das Querschnittselement dF einzusetzen:

$$dF = \rho d\varphi dp,$$

wobei $d\varrho$ beim infinitesimalen Summieren über alle unendlich kleinen Radius-elemente innerhalb der Grenzen R und r eine radiale Strecke der Querschnitts-fläche ergibt. $\varrho d\psi$ ergibt beim Integrieren in den Grenzen 0 und 2π , 0 und ϱ eine Schar von konzentrischen Kreisen um den Mittelpunkt des Querschnitts.

Das Produkt beider Größen integriert erfaßt also innerhalb der Integralgrenzen alle Flächenelemente des kreisringförmigen Querschnitts. Als Summe aller Flächenelemente ergibt das Integral die Querschnittsfläche.

Im Ausdruck (6) steht außer dem Flächenelement dF noch y^2 . y ist der Abstand eines beliebigen Flächenelementes von der neutralen Faser, die ja einen Durchmesser des Kreisringes bildet. Es ist abhängig von der Lage des jeweiligen Flächenelementes. Wenn man y^2 in das Integral als Faktor einbezieht, bekommt man ein Drehmoment $\mathfrak{M}$ als Ergebnis des bestimmten Integrals. Dieses Drehmoment entsteht als Summe aller derjenigen Momente, die die Gesamtheit aller Fasern ihrer Längsveränderung entgegensetzt.

Das y^2 kann man in Abhängigkeit von den beiden Veränderlichen ϱ und ψ ausdrücken, indem man für

$$y = \varrho \sin \psi$$

setzt.

Man erhält:

$$J = \int_r^R \int_0^{2\pi} \varrho^2 d\psi d\varrho \sin^2 \psi$$

$$J = \int_r^R \int_0^{2\pi} \varrho^3 \sin^2 \psi d\psi d\varrho$$

Wir haben also zwei Integrale, die voneinander unabhängig sind, aber als Faktoren das Flächenträgheitsmoment darstellen. Das erste Integral ist elementar zu lösen:

$$J = \left[\frac{\varrho^4}{4} \right]_r^R \int_0^{2\pi} \sin^2 \psi d\psi$$

Das zweite Integral läßt sich mit Hilfe der Multiplikationsregel lösen:

$$\int u v' = u v - \int u' v$$

$$\int \sin^2 \psi d\psi = \int \sin \psi \sin \psi d\psi$$

(u)
(v')

Also:

$$\int \sin \psi \sin \psi \, d\psi = -\sin \psi \cos \psi + \int \cos \psi \cos \psi \, d\psi.$$

Da aber:

$$\cos^2 \psi = 1 - \sin^2 \psi,$$

wird:

$$\begin{aligned} \int \sin \psi \sin \psi \, d\psi &= -\sin \psi \cos \psi + \int 1 - \sin^2 \psi \, d\psi \\ &= -\sin \psi \cos \psi + \psi - \int \sin^2 \psi \, d\psi. \end{aligned}$$

Das letzte Integral wird durch Addition dem ursprünglichen Integral zugefügt:

$$\begin{aligned} 2 \int \sin^2 \psi \, d\psi &= -\sin \psi \cos \psi + \psi \\ \int \sin^2 \psi \, d\psi &= \frac{1}{2} (\psi - \sin \psi \cos \psi) \end{aligned}$$

Damit ist das Integral gelöst. Setzt man es mit den Grenzen in den Ausdruck für das Flächenträgheitsmoment ein, so bekommt man:

$$J = \left[\frac{R^4}{4} \right]_r^R - \left[\frac{1}{2} (\psi - \sin \psi \cos \psi) \right]_0^{2\pi}$$

Da das letzte Glied, das Produkt der Winkelfunktionen, beim Einsetzen beider Grenzen zu Null wird, bekommt man den schon bekannten Ausdruck:

$$J = \frac{\pi}{4} (R^4 - r^4).$$

IV. UNTERSCHIEDE ZWISCHEN PRAKTISCHEM FALL UND PHYSIKALISCHER BETRACHTUNG

Das errechnete Ergebnis kann nicht ohne weiteres auf den praktischen Fall übertragen werden. Zähne bestehen aus gewachsenem Material, das natürlich inhomogen ist, wie ja schon Dentinkanälchen, Interglobularräume und die Thomes'sche Körnerschicht im mikroskopischen Bilde ausweisen. Die äußere Form des Zahnes und der Verlauf seines Wurzelkanales weichen sehr stark von den Verhältnissen ab, die beim Entwickeln obiger Beziehung vorausgesetzt wurden, nämlich zylindrische Form des Prüfkörpers und gleichmäßiger gerader Verlauf des Kanales. Schließlich besteht eine sehr zweifelhafte Verbindung

zwischen zwei Materialien verschiedenen Elastizitätsmoduls, der Zement zwischen Metall und Dentin, wenn ein Wurzelstift eingefügt wurde.

Alle diese Abweichungen lassen sich nicht leicht in ihren Auswirkungen auf die Deformierbarkeit der Wurzel übersehen.

Hier muß das Experiment entscheiden, wobei die Verhältnisse in der Praxis möglichst genau nachgeahmt werden müssen.

V. BESCHREIBUNG DER VERSUCHE

Die hierzu angestellten Versuche und die angewandte Apparatur seien im folgenden beschrieben.

a) Auswahl der Zähne

Für die Messungen wurden ausschließlich einwurzelige Zähne benutzt. Um Veränderungen des Dentins - Austrocknen, Rißbildungen und Rarifizierung der organischen Matrix mit daraus entstehenden Hohlräumen - zu vermeiden, wurden nur solche Zähne ausgewählt, die frisch extrahiert waren, sofort in physiologische Kochsalzlösung kamen und darin höchstens einige Tage gelegen hatten. Ihre Krone mußte gut erhalten und nur wenig gefüllt sein; wurzelbehandelte Zähne wurden verworfen, um unkontrollierbare Veränderungen des Dentins durch Maßnahmen des Vorbehandlers auszuschließen, etwa Erweitern der Kanäle mit Aqua regia, Oxydationen der organischen Grundsubstanz.

Es ist berechtigt, diese Einschränkungen zu machen, weil ja die Verhältnisse an natürlichen, unveränderten Zähnen mit denen verglichen werden sollen, wie sie nach Eingliedern einer Stiftkrone vorliegen. Nur nach einer Vitalexstirpation der Pulpa hat sich das Dentin so wenig verändert, daß Änderungen im elastischen Verhalten nur auf das Einfügen des Wurzelstiftes zurückzuführen sind. Diese Veränderung soll geprüft werden. Die Verhältnisse an Zähnen, die nach länger zurückliegender erstmaliger Wurzelbehandlung endlich mit einem Stiftaufbau versorgt wurden, mögen von den hier geschilderten abweichen.

Endlich wurden nur solche Zähne verwandt, auf denen man auch im praktischen Fall eine Stiftkrone verankern würde, also obere Frontzähne, Prämolaren - erste Prämolaren nur bei miteinander verwachsenen Wurzeln - untere Eckzähne und Prämolaren.

Dabei wurden sowohl völlig kariesfreie als auch kariöse und gefüllte Zähne verwandt. Entweder hatte bei ihnen Sekundärdentinbildung im Wurzelkanal das

elastische Verhalten verändert - darauf antwortet der Zahnhalteapparat mit Umbauvorgängen - oder es hatten im anderen Falle regressive Veränderungen der Pulpa stattgefunden, die ihrerseits die Elastizität des Dentins beeinflusst hatten.

In jedem Falle hatten geraume Zeit vor der Extraktion Verhältnisse vorgelegen, die bei der Indikation zum Eingliedern einer Stiftkrone ebenfalls gegeben sind; seien es kariöse Zerstörungen oder Verlängerung der klinischen Krone, die zur Abtragung gezwungen hätten. Entsprechend der Verteilung dieser pathologischen Befunde in der Praxis wird eine Statistik der Untersuchungsergebnisse wirklich einen Vergleich erlauben, wie das elastische Verhalten der kranken Zähne durch das Einfügen des Wurzelstiftes verändert worden ist.

b) Behandlung der Zähne vor und während der Messungen

Die nach den vorhin genannten Gesichtspunkten ausgewählten Zähne wurden incisal des Tuberkulums bzw. in der Hauptfissur mit einem Diamantschleifkörper trepaniert. Mit einem Rosenbohrer wurden die Reste der Kronenpulpa entfernt und der Wurzelkanaleingang freigelegt. Alsdann wurden sie wie unten beschrieben in die Einspannvorrichtung der Apparatur eingebettet. Zwischen allen Meßgängen stand die Wurzel in physiologischer Kochsalzlösung.

Nach der ersten, weiter unten beschriebenen Messung wurde der Wurzelkanal ausgeschachtet, wobei Wärmeentwicklung vermieden wurde. Hierzu dienten maschinelle Aufbereitungsinstrumente, Querschnittsbohrer und Beutelrockbohrer. Nach Einpassen eines Nickelinstiftes, dessen unteres Drittel konisch geschliffen war, wurde der Zahn erneut ohne Stift geprüft.

Schließlich wurde der Stift nach üblicher Trocknung und Reinigung des Kanals mit Hilfe von Watte und Millernadeln mit Phosphatzement eingesetzt. Er wurde so tief eingeführt, daß die bekannte Mindestforderung - Stiftlänge gleich Kronenlänge - bei allen Messungen übererfüllt war, was wegen der konischen Spitze wünschenswert ist.

Es folgte, nachdem der Zement mindestens über Nacht abgebunden hatte, die dritte Messung.

Drei Stiftstärken wurden verwandt: 2 mm Ø für Eckzähne, 1,8 mm Ø für mittlere Schneidezähne und starke Prämolaren, 1,5 mm Ø für seitliche Schneidezähne und schwache Prämolaren.

c) Erläuterungen zum Meßvorgang

Untersucht man, wie es Steiger und Katz getan haben, die Kräfte, die eine Stiftkrone in der Funktion treffen, und die Art, wie sie von den Verankerungselementen aufgenommen werden, so erkennt man, daß eine Komponente einer beliebig auftreffenden Kraft die Wurzel in Achsenrichtung staucht, während die dazu senkrechte Komponente den Stift herauszuziehen sucht.

Hält dieser der Kraft stand, so wird die Wurzel in ihrer Längsrichtung verbogen, weil sich einerseits die Krone auf den dem Angriffspunkt der Kraft abgewandten Wurzelrand stützt, der auf Biegung beanspruchte Stift andererseits eine Kraft auf dieselbe Wand des Wurzelkanales ausübt. Beide Kräfte beantwortet die Wurzel mit einer Durchbiegung, wobei die kraftseitige Kanalwandung natürlich mit verformt wird.

Diese Durchbiegung wurde im Versuch nachgeahmt.

d) Beschreibung der Apparatur

1. die Presse

E. Sauer hat in seiner Dissertation eine Apparatur angegeben, die er zur Prüfung des elastischen Verhaltens natürlicher Zähne benutzte. Diese noch im Original vorhandene Apparatur wurde in abgeänderter Form zu den Messungen verwandt.

Übernommen wurden Sauers Hebelpresse und seine Haltevorrichtung. Beide bieten in ihrer soliden Ausführung die Gewähr, daß innerhalb des benötigten Meßbereiches keine meßbaren Deformationen der Apparatur auftreten, die das Ergebnis fälschen würden. Dies wurde durch wiederholte Leerversuche bestätigt.

2. die Meßvorrichtung

Die mechanischen Meßvorrichtungen, Halteschiene, Meßhebel, Achsenträger und Meßuhr, wurden entfernt und durch ein Aufsichtmikroskop der Firma E. Leitz mit Okularmikrometer ersetzt. Dieses Aufsichtmikroskop kann so eingestellt werden, daß die Achse des Tubus waagerecht, also im rechten Winkel zur verformenden Kraft steht. Es gestattet, den Rand einer durch das Foramen apicale geschobenen Millernadel zu betrachten und seine Ortsveränderung beim Biegen der Wurzel mit Hilfe des Okularmikrometers zu messen.

Zur Prüfung, ob die Nadel unverrückbar fest mit der Wurzel verbunden war, wurde sie wie bei einer Stimmgabel durch Anreißen in Schwingungen versetzt.

Schwirrte der Schaft, so konnte feste Verbindung angenommen werden. Eingestellt wurde eine Stelle der Nadel, die möglichst nahe dem Foramen apicale lag.

Die optische Messung der Deformationsstrecke wurde gewählt, um auch geringfügige Änderungen des Elastizitätsmoduls exakt erfassen zu können.

3. Meßgenauigkeit

Weiter bestand die Möglichkeit, durch richtige Auswahl der Optik eine solche Ablesegenauigkeit zu wählen, daß eine Reihe von unvermeidbaren Meßfehlern die Ergebnisse nicht beeinflussen konnte.

Bei den vorliegenden Messungen wurde ein Objektiv mit einer solchen Vergrößerung gewählt, daß eine Strecke von 1 mm Länge durch das Meßokular in 62 Teile geteilt wurde, wie durch Betrachtung eines Meßobjektträgers mit einer in 200 Teile zerlegten 2 mm langen Skala festgestellt wurde. Die Teilstriche des Meßokulars waren einerseits genügend weit voneinander entfernt, die Abbildungsschärfe andererseits so gut, daß bequem zu entscheiden war, ob der Rand der Millernadel sich mit einem von zwei benachbarten Teilstriichen deckte oder ob er zwischen ihnen stand. Man konnte also eine Strecke von 1 mm mit genügender Sicherheit in 124 Teile teilen. Die Ablesegenauigkeit betrug daher $\pm 0,008$ mm.

Wiederholte Leermessungen mit aufgesetztem Gewicht, eingespanntem Zahn, aber ohne Druckstift, bewiesen, daß bei Beschränkung auf obengenannte Ablesegenauigkeit unter einer Voraussetzung die Meßfehler nur unwesentlich, weil nicht ablesbar, das Ergebnis beeinflussen.

Diese Voraussetzung mußte gemacht werden, weil die beiden Apparaturen, Presse und Mikroskop, aus räumlichen Gründen nebeneinander auf einem Holztisch stehen mußten. Es war nicht möglich, sie starr miteinander zu verbinden. Jedoch gelang es, den Meßfehler, der durch Durchbiegen der Tischplatte beim Auflegen des Gewichtes entstand, bis unter die Ablesegrenze zu reduzieren. Dazu wurden die Grundplatten der Apparate möglichst dicht nebeneinander über den Unterzug gestellt, der zwei Tischbeine miteinander verbindet. Achtete man nun noch darauf, daß beim Ablesen der Tisch nicht berührt wurde, so blieb dieser Fehler gering, wie ebenfalls durch Messungen ohne Druckstift bewiesen wurde.

Wünschenswert wäre es gewesen, wenn ein Betontisch zur Verfügung gestanden hätte.

4. Andere Möglichkeiten, die Deformationen zu messen

Es sei gestattet, auch über Versuche zu berichten, die angestellt wurden, um auf anderem Wege eine genaue Messung der elastischen Verformung der Wurzel zu erhalten.

Ein Lichtzeigersystem, bestehend aus Lampe, Blende, Linse, Spiegel und Meßlatte, wurde erprobt, aber aus grundsätzlichen Erwägungen heraus verworfen. Hierzu befestigt man ein Spiegelchen an der Wurzelspitze. Der Spiegel erfährt beim Biegen der Wurzel eine Änderung seines Winkels zur optischen Achse des einfallenden Strahles und eine Ortsveränderung.

Es bereitet Schwierigkeiten, den Spiegel an der feuchten Wurzel so fest anzubringen, daß die Bewegung des Spiegels wirklich verbindliche Aussagen über die Bewegung der Wurzelspitze erlaubt. Die Änderung von Ort und Winkel zugleich bereitet zudem rechnerische Schwierigkeiten bei der quantitativen Auswertung des Ausschlages. Hinzu kommt die Überlegung, daß auch die Winkeländerung allein keine proportionale Beziehung zwischen Durchbiegung der Wurzel und Ausschlag ergibt. Bei den recht verschiedenen Formen und Größen der Wurzeln weicht die Kurve, die die neutrale Faser beim Biegen bildet, sehr stark von der Kreisform ab. Damit geht die Proportionalität zwischen Krümmungsradius, Winkeländerung und Ausschlag verloren.

Eine bessere Möglichkeit besteht darin, mit einem an der Wurzelspitze befestigten Faden die Bewegung auf einen Torsionsdraht zu übertragen. Dazu wird der Faden um den Draht gewickelt und dann daran befestigt. Ein am Draht angeklebter Spiegel gestattet, den Torsionswinkel zu messen. Abhängig von der Drahtdicke erlaubt eine Winkeländerung Rückschlüsse auf die Abstandsänderung zwischen Wurzelspitze und Draht.

Eine solche Apparatur ist in der Physiologie als "isometrischer Hebel" bekannt.

So praktisch dieser isometrische Hebel bei genaueren Messungen größerer Strecken ist, im vorliegenden Fall wäre der größere Aufwand bei seiner Herstellung und bei der notwendigen festen Verbindung aller Teile des optischen Systems mit der Apparatur unnötig gewesen. Die zu messenden Strecken waren ziemlich klein. Die Meßwerte wären wegen der vielen Fehlerquellen wahrscheinlich nicht genauer zu reproduzieren als bei der angewandten Methode.

5. Die Einspannvorrichtung

Bei allen mechanischen Festigkeitsprüfungen ist die feste, unbewegliche Verbindung des zu prüfenden Körpers mit der Apparatur problematisch. Ist doch

bei der Geringfügigkeit der Veränderungen der Meßfehler durch eine unzuverlässige Einspannung unübersehbar groß.

Da es sich bei den in dieser Arbeit beschriebenen Messungen um Vergleiche handelt, wird sich ein systematischer Fehler weniger auswirken; um so nötiger ist es, bei allen Messungen die gleichen Einspannbedingungen vorauszusetzen.

Eine weitere Schwierigkeit beim Einspannen entsteht dadurch, daß ein Zahn als Meßobjekt ziemlich klein ist.

Mehrere Möglichkeiten, den Zahn einzuspannen, wurden erprobt und als die beste die folgende beibehalten:

In Stahlwürfel von 20 mm Kantenlänge wurde senkrecht zu einer Fläche ein Loch von 10 mm Durchmesser und 15 mm Tiefe gebohrt. Ein Kanal von 4 mm Durchmesser verbindet den Boden des Loches zentrisch mit der gegenüberliegenden Fläche des Würfels.

Die Zähne wurden, wie schon beschrieben, trepaniert. Ein Drahtstift wurde mit Aluminiumfolie umwickelt und in den Trepanationskanal gesteckt. Nun wurde die große Öffnung des Würfels mit einem besonders harten Gips, wie er zum Herstellen von Inlay- und Kronenstumpfmodellen im Handel erhältlich ist, gefüllt. Hierbei wurde die Vorschrift des Herstellers beim Anrühren des Gipses genau eingehalten, dem Gipsbrei also die Konsistenz von Glaserkitt verliehen. Der Zahn wurde mit dem Drahtstift voran in den Gips gesteckt, so daß er bis zur Schmelz-Zementgrenze darin festgehalten wurde. Der Drahtstift ragte durch den Kanal des Würfels hindurch und konnte nach Abbinden des Gipses über Nacht entfernt werden. Die Aluminiumfolie isolierte den Draht gegen den Gips. Der Trepanationskanal blieb von außen zugänglich, was für die folgenden Messungen nötig war.

Versuche, den Gips durch schnellhärtenden Kunststoff oder Phosphatzement zu ersetzen, scheiterten an der starken Abbindekontraktion dieser Materialien. Der Zahn wurde locker.

Zähne, die wegen starker Abrasion nur noch eine kurze Krone besaßen, lockerten sich manchmal auch bei Einbettung in Gips. Dies äußerte sich in Meßwerten, die völlig willkürlich streuten und nicht reproduzierbar waren. Solche Zähne wurden sofort verworfen. Die aufgenommenen Meßwerte zeigen ausnahmslos keine auffälligen Streuungen. Es darf angenommen werden, daß sie nur von einwandfrei eingebetteten Zähnen stammen.

Der Würfel mit dem eingebetteten Zahn wurde in die von Sauer angegebene Einspannvorrichtung eingesetzt. Er gestattet, die Wurzel aus zwei Richtungen zu belasten.

Auch zur Prüfung dieser Einspannvorrichtung wurden Versuche angestellt. Dazu wurde ein Bohrer mit seinem konischen Ansatz so im Trepanationskanal eines einwandfrei eingebetteten Zahnes festgekeilt, daß er die Wände des Kanals im Würfel nicht berührte. Auch bei starker Belastung der Wurzel war mit dem Aufsichtmikroskop am herausragenden Ende des Bohrerschaftes keine Bewegung zu registrieren. Eine Bewegung der Krone im Gips oder des Würfels im Schraubstock hätte am langen Hebelarm des Bohrers unbedingt sichtbar werden müssen.

6. Die Belastungsvorrichtung

An der Sauer'schen Apparatur war ursprünglich ein Hebel, der mit seinem Übersetzungsverhältnis erlaubte, mit kleinen Gewichten große Kräfte auszuüben. Er wurde entfernt. Stattdessen wurde eine runde Platte aus Resartglas, einem plexiglasähnlichen Kunststoff, mit einem Durchmesser von 120 mm und einer Dicke von 30 mm auf dem oberen Ende des Druckbolzens befestigt. Eine Galerie aus Aluminiumblech sicherte eine Polyäthylenflasche mit einem Inhalt von 2000 ml gegen seitliches Abrutschen. In die Flasche wurden abgemessene Mengen Quecksilber eingefüllt.

Das tote Gewicht von Druckbolzen, Druckstift, Waagschale mit Galerie und leerer Flasche betrug 880 pd. Dies war damit die geringste Kraft, die zum Messen zur Verfügung stand. Sie wurde allerdings nicht ausgenutzt, weil bei dieser Belastung die Deformation der Wurzel zu gering war. Der Meßwert wurde ungenau.

Die Verwendung von Quecksilber als Gewicht macht es sehr einfach, das tote Gewicht bei den Messungen zu berücksichtigen, ohne umständlich tarieren zu müssen. Die Flüssigkeit läßt sich gut dosieren, so daß jede Teilmenge leicht einzustellen ist.

Weiterhin bietet das Quecksilber den Vorteil, sich so zu verteilen, daß die Resultierende aller auf die Waagschale treffenden Kräfte in die Symmetrieachse des Druckbolzens fällt. Große extraaxiale Kräfte können nicht entstehen, die den Druckbolzen in seiner Führung verkanten.

Der Druckbolzen wurde gut eingeölt, so daß bei recht guter Passung und gleichmäßiger Belastung ein Minimum an Reibung auftrat.

Abgemessen wurde das Quecksilber in einer Mensur, die mit ihren Teilstrichen gestattete, Mengen von 5 ml abzufüllen. Mehrfach durchgeführte Versuche bewiesen, daß trotz der hohen Dichte des Quecksilbers die Meßgenauigkeit des Gefäßes ausreichte, um keine meßbaren Differenzen bei der gleichen Messung mit verschiedenen, aber gleich abgemessenen Quecksilbermengen entstehen zu lassen.

Die Belastungsanordnung erlaubt eine bessere Reproduktion der Kräfte, die zur Messung verfügbar sind, als die Hebelübersetzung; dies gilt vor allem für kleine Kräfte.

Um gesundheitliche Schäden und Verseuchungen des Labors durch Quecksilberdämpfe während der Messungen und später zu vermeiden, wurde grundsätzlich jede Manipulation mit geöffneter Flasche bei offenem Fenster und über einer Zinkwanne durchgeführt, deren Boden mit Wasser bedeckt war. Verschüttetes Quecksilber konnte leicht aufgefangen und gesammelt werden. Tatsächlich war der Quecksilberverlust nach Beendigung der Versuche unmerklich gering.

Die durch das Gewicht des Quecksilbers erzeugte Kraft wurde entsprechend der von Sauer beschriebenen Methode durch einen Stift mit gehärteter Spitze auf ein durch Anbohren hergestelltes Plateau nahe der Wurzelspitze übertragen.

Zum Einfüllen weiteren Quecksilbers wurde die Flasche von der Waagschale genommen; die Wurzel hatte in der Zwischenzeit Gelegenheit, sich wieder zurückzubiegen. Dies entspricht den tatsächlichen Gegebenheiten im Munde, wo ja ebenfalls im normalen Fall nur kurze Belastungen auftreten.

VI. MESSERGEBNISSE UND AUSWERTUNG

Bei der nun folgenden Aufzählung der Meßergebnisse wird nach der laufenden Nummer des Versuchskörpers angegeben, um welche Zähne es sich handelt. Bestanden Zweifel darüber, wurde nach den noch erkennbaren Merkmalen wenigstens die Zahngruppe angegeben. Solche Zweifel können besonders leicht bei den unteren Prämolaren aufkommen.

Die Längenangabe, die dem Zahnsymbol folgt, bedeutet in jedem Fall den Hebelarm, an dem die Kraft ansetzte. Er wurde gemessen zwischen der Oberfläche des Gipses am Zahnhals und dem Angriffspunkt der Kraft.

In der nächsten Zeile stehen hinter dem Zeichen G die einwirkenden Kräfte.

Darunter stehen die jeweiligen Deformationsstrecken l. Sie sind parallel zum Druckstift gemessen als Ortsveränderung der Wurzelspitze mit eingeschobener Millernadel längs der so festgelegten Richtung.

Die Indices bedeuten:

- l: Messungen am unveränderten Zahn
- l_a : (ab Versuch 15) Messungen am Zahn mit ausgeschachtetem Kanal
- l_w : Messungen am Zahn mit Wurzelstift

Eckzähne wurden in zwei Richtungen belastet: in Richtung des größten und des kleinsten Wurzeldurchmessers. Entsprechend wurden hierbei weitere Indices gebraucht:

- l_h und l_{hk} : Belastung in Richtung des größten Wurzeldurchmessers
- l_f : Belastung in Richtung des kleinsten Wurzeldurchmessers

Die weiteren Indices a und w folgen entsprechend den Messungen an anderen Zähnen.

Versuch 1: $\sqrt{3}$

G:	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	kp
l_{fl} :	0,03	0,06	0,10	0,11	0,14	0,18	0,21	0,26	0,29	0,36	mm
l_{hk} :	0,02	0,03	0,04	0,06	0,07	0,09	0,10				mm
l_{flw} :	0,03	0,08	0,11	0,16	0,19	0,24	0,27	0,31		0,40	mm
l_{hkW} :	0,02	0,02	0,05	0,06	0,06		0,11		0,15	0,16	mm

Die Werte mit Wurzelstift sind wegen Längsfraktur unzuverlässig, seien aber zum Vergleich mit angeführt.

Versuch 2: unterer erster Prämolare, 11 mm lang.

G:	2	3	4	kp
l :	0,10	0,15	0,21	mm

Wegen Fraktur mußte der Versuch abgebrochen werden. Der Zahn hatte einen circulären kariösen Defekt.

Versuch 3: unterer Prämolare, 12 mm lang.

G:	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	kp
l :		0,03		0,06		0,10		0,13		0,18	mm
l_w :	0,01	0,02		0,03	0,04	0,05	0,06	0,08	0,10	0,12	mm

Versuch 4: $\frac{3}{/}$, 15,5 mm lang.

G:	1	2	3	4	6	kp
l :		0,06		0,11	0,15	mm
l_w :	0,03	0,06	0,08	0,11	0,16	mm

Der Zahn war so eingebettet worden, daß er in einer Richtung mittleren Wurzeldurchmessers belastet wurde. Deshalb wurde auf Belastung flach und hochkant getrennt verzichtet. Der Stift konnte nicht tief eingeführt werden.

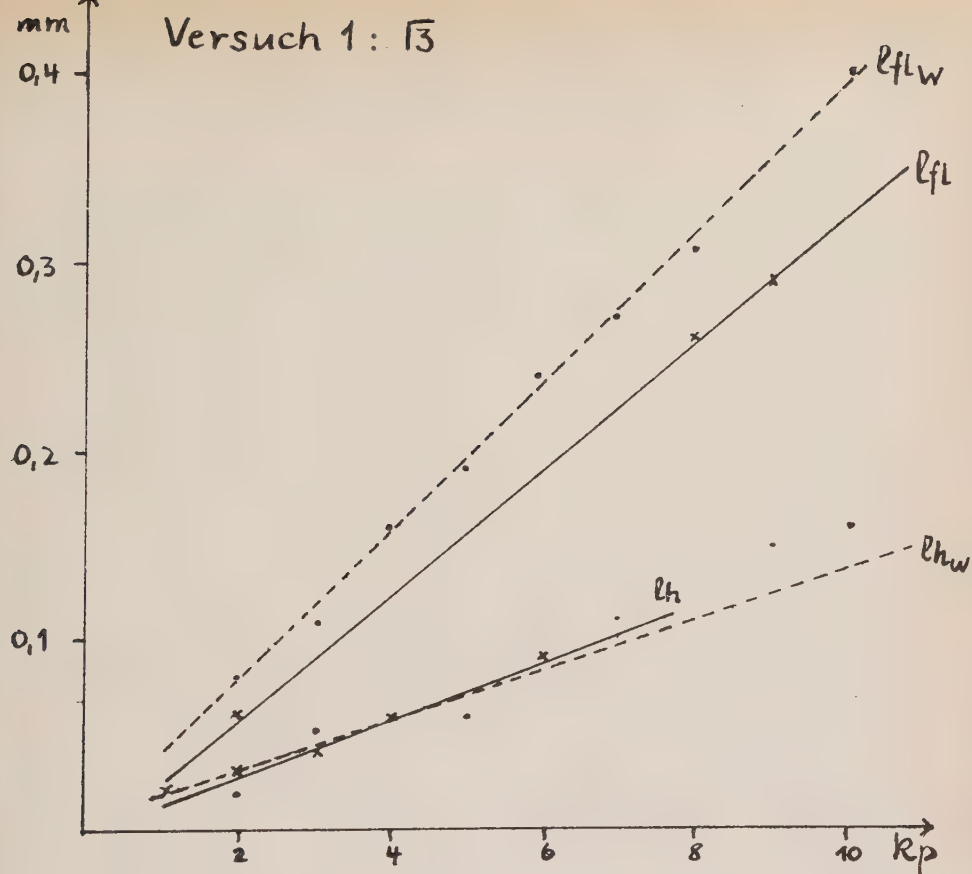
Versuch 5: $\frac{1}{/}$, 12 mm lang.

G:	1	2	3	4	6	8	kp
l :		0,03		0,06	0,11	0,16	mm
l_w :	0,02	0,03	0,04	0,06	0,09	0,12	mm

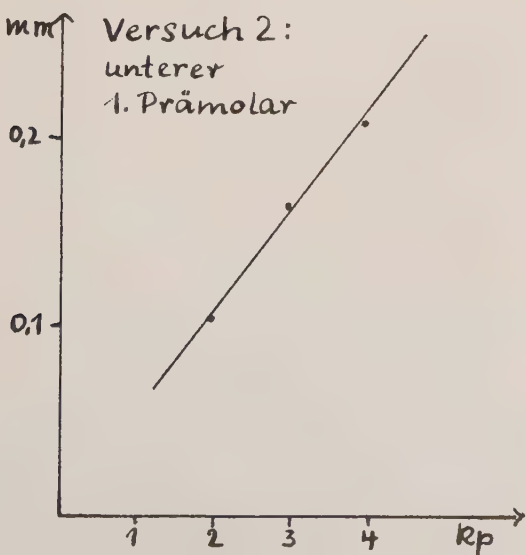
Versuch 6: $\frac{4}{/}$, einwurzeliger Zahn mit semmelförmigem Kanal, ausgeschachtet wurde nur eine Erweiterung. 13 mm lang.

G:	2	4	5	6	8	9	10	kp
l :	0,02	0,03		0,05	0,06		0,10	mm
l_w :	0,02	0,04	0,05	0,06	0,06	0,07	0,08	mm

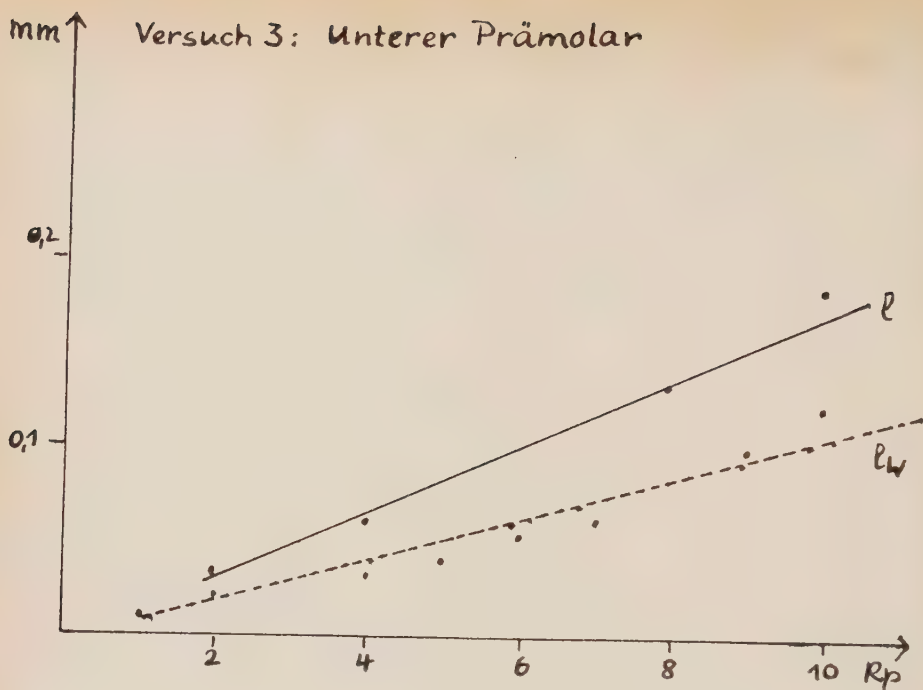
Versuch 1: $\sqrt{3}$



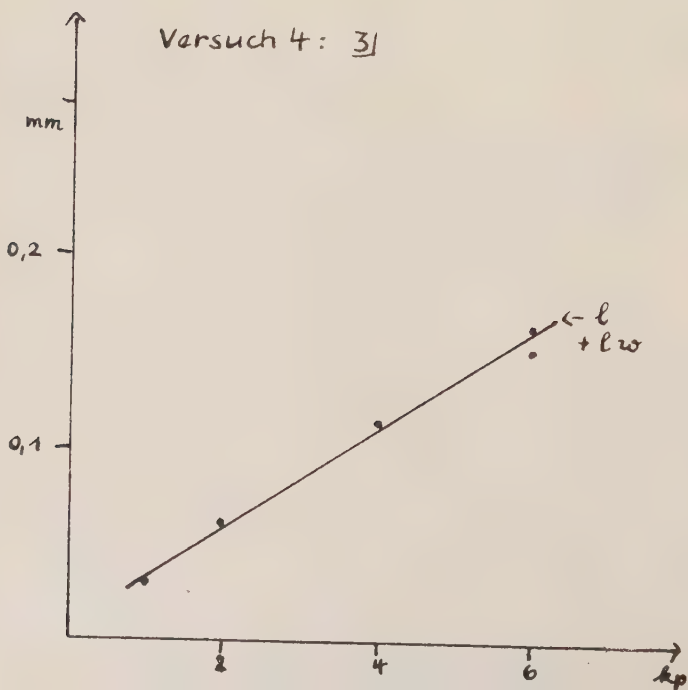
Versuch 2: unterer 1. Prämolare

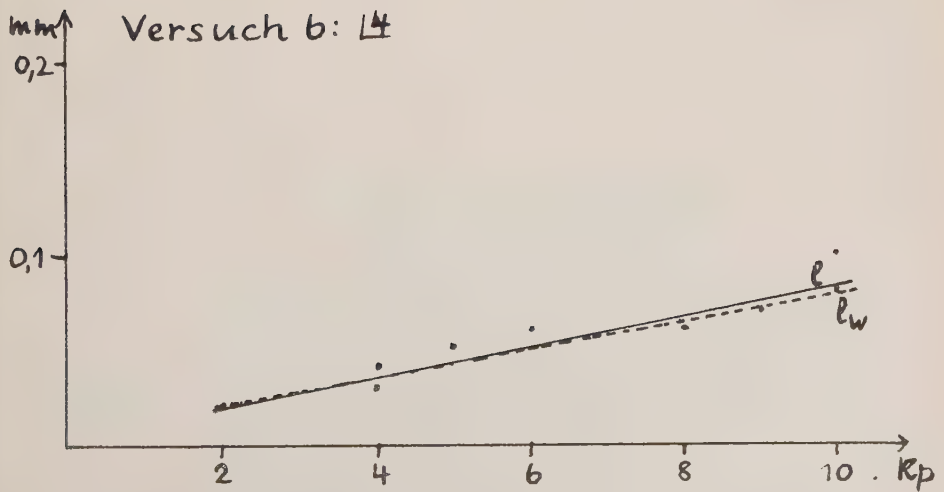
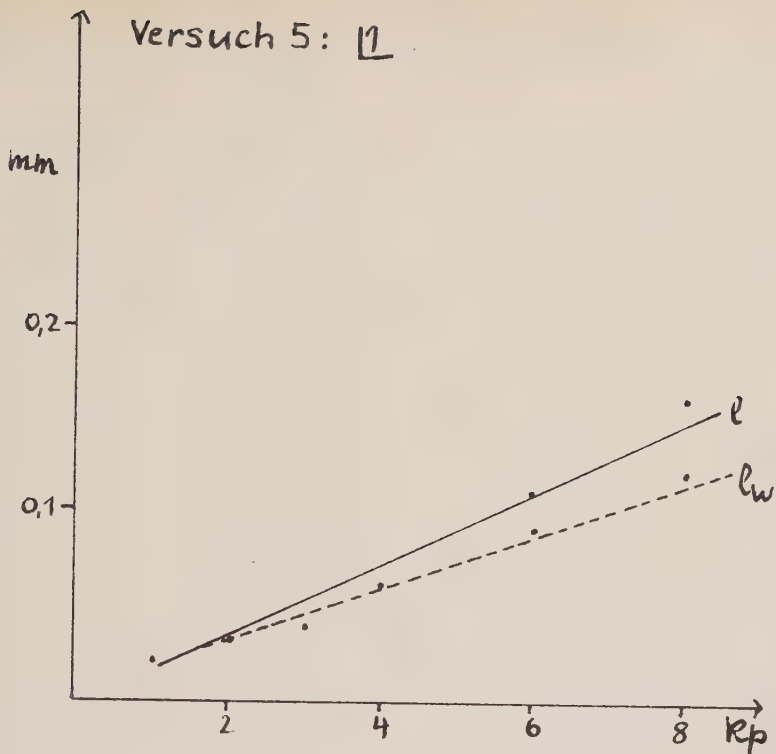


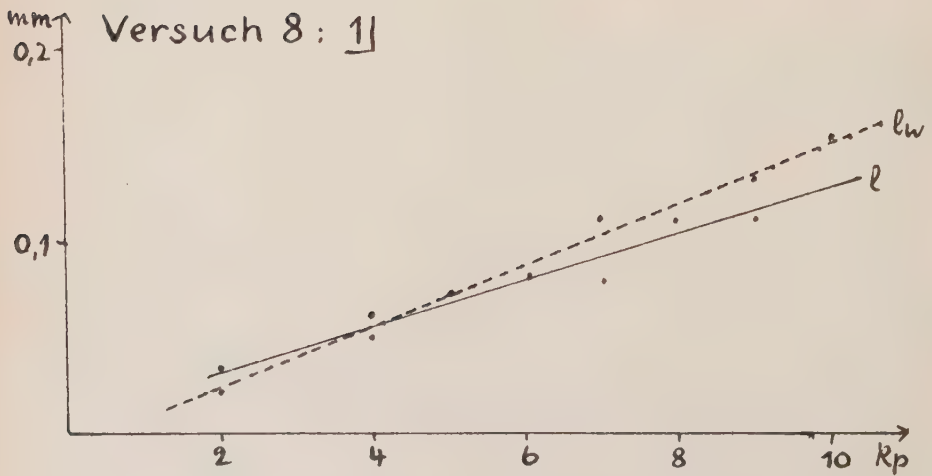
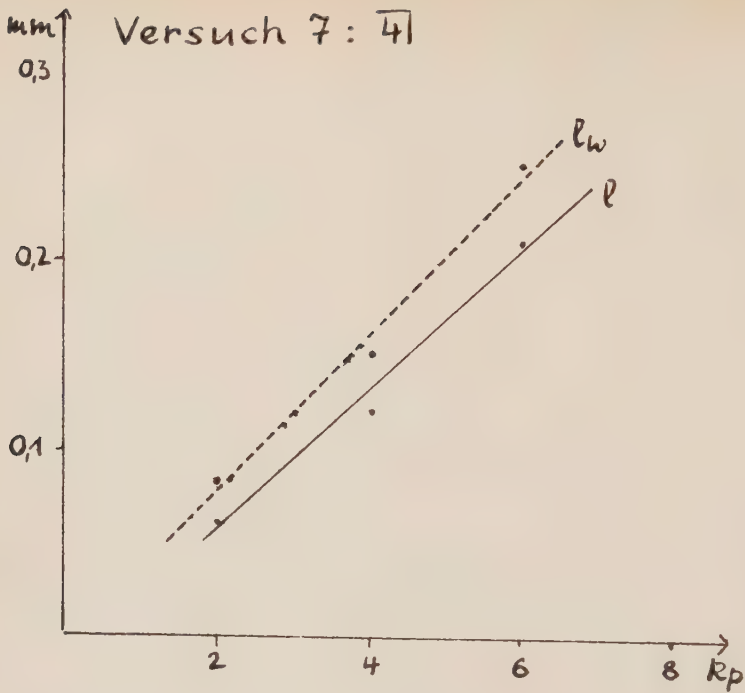
Versuch 3: Unterer Prämolare



Versuch 4: 3







Versuch 7: $\overline{4/}$, 16 mm lang.

G:	2	4	6							kp
l:	0,06	0,12	0,21							mm
l _w :	0,08	0,15	0,25							mm

Versuch 8: $\underline{1/}$, 10 mm lang

G:	2	3	4	5	6	7	8	9	10	kp
l:	0,03	0,04	0,05	0,06	0,06	0,08	0,11	0,11	0,14	mm
l _w :	0,02	0,04	0,06	0,07	0,08	0,11	0,11	0,13	0,15	mm

Versuch 9: unterer Prämolare, 15 mm lang.

G:	1	2	3	4						kp
l:	0,11	0,25	0,42	0,58						mm
l _w :		0,21		0,6						mm

Versuch 11: $\underline{5/}$, 14,5 mm lang

G:	1	2	4	5	6	7				kp
l:	0,02	0,07	0,15	0,20	0,25	0,30				mm
l _w :	0,04	0,07	0,11	0,15	0,19	0,23				mm

Versuch 14: $\underline{2/}$, 12 mm lang

G:	1	2	3	4	5	6				kp
l:		0,06	0,09	0,13	0,15	0,21				mm
l _w :	0,03	0,07	0,11	0,14		0,19				mm

Versuch 15: $\underline{3/}$, 14 mm lang

G:	2	3	4	5	6	8	10			kp
l _h :	0,03	0,06	0,07	0,09	0,11	0,16	0,22			mm
l _{fl} :	0,06		0,13	0,15	0,22	0,30				mm
l _{ha} :	0,03		0,08			0,18				mm
l _{fla} :			0,15		0,27					mm

Hier bedeutet: l_h: Messung hochkant unausgeschachtet,
l_{fl}: Messung flach unausgeschachtet,
l_{ha}: Messung hochkant ausgeschachtet,
l_{fla}: Messung flach ausgeschachtet.

Die Messung mußte wegen Fraktur abgebrochen werden.

Versuch 16: $\frac{2}{/}$, 11 mm lang

G:	2	4	<u>6</u>		kp
----	---	---	----------	--	----

l:	0,06	0,12	0,20		mm
----	------	------	------	--	----

l _a :	0,06	0,14	0,21		mm
------------------	------	------	------	--	----

l _w :	0,04	0,09	0,14		mm
------------------	------	------	------	--	----

Hier bedeutet: 1: Messung unausgeschachtet,
l_a: Messung ausgeschachtet, ohne Wurzelstift;
l_w: Messung ausgeschachtet, mit Wurzelstift.

Versuch 17: $\frac{1}{/}$, 13 mm lang

G:	2	4	6	8	kp
----	---	---	---	---	----

l:	0,04	0,09	0,13	0,18	mm
----	------	------	------	------	----

l _a :	0,03	0,08	0,13	0,18	mm
------------------	------	------	------	------	----

l _w :	0,05	0,09	0,13	0,18	mm
------------------	------	------	------	------	----

Indices wie bei Versuch 16, ebenso bei den folgenden Versuchen, bei Eckzähnen wie bei Versuch 15.

Versuch 18: $\frac{1}{/}$, 12 mm lang

G:	2	4	6	8	kp
----	---	---	---	---	----

l:	0,03	0,08	0,14	0,21	mm
----	------	------	------	------	----

l _a :	0,05	0,10	0,14	0,19	mm
------------------	------	------	------	------	----

l _w :	0,04	0,08	0,12	0,17	mm
------------------	------	------	------	------	----

Versuch 19: $\frac{1}{/}$, 12 mm lang

G:	2	4	6	8	kp
----	---	---	---	---	----

l:	0,02	0,06	0,10	0,17	mm
----	------	------	------	------	----

l _a :	0,04	0,07	0,14	0,15	mm
------------------	------	------	------	------	----

l _w :	0,03	0,06	0,10	0,14	mm
------------------	------	------	------	------	----

Versuch 20: $\frac{1}{/}$, 13,5 mm lang

G:	2	4	6	8	kp
----	---	---	---	---	----

l:	0,04	0,06	0,10	0,15	mm
----	------	------	------	------	----

l _a :	0,06	0,09	0,13	0,17	mm
------------------	------	------	------	------	----

l _w :	0,02	0,06	0,09	0,12	mm
------------------	------	------	------	------	----

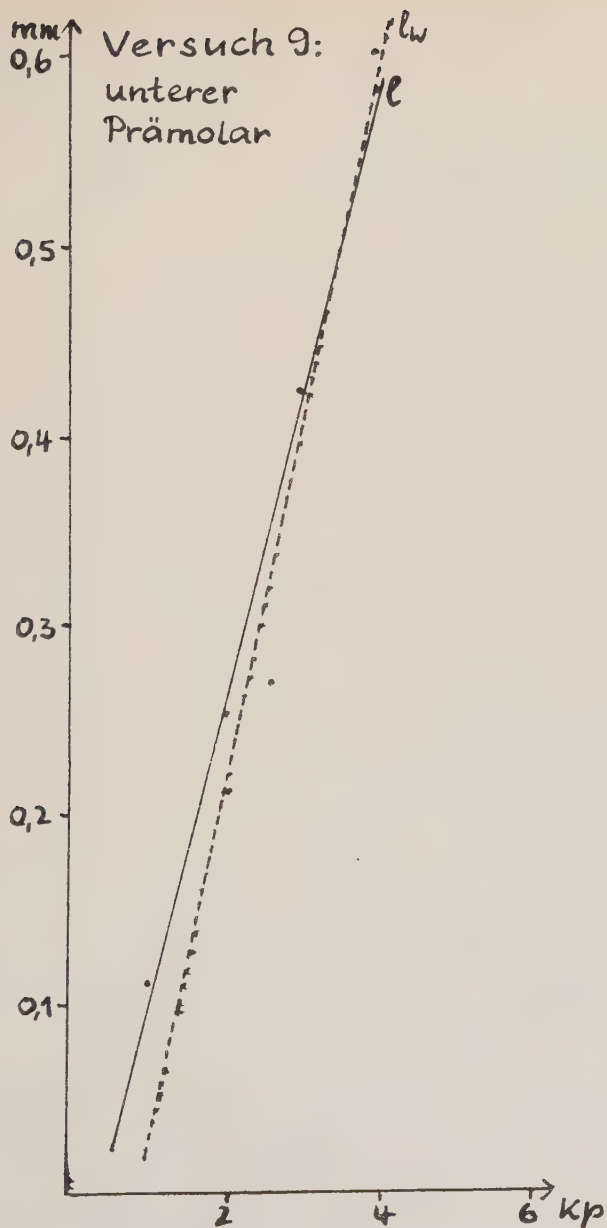
Versuch 21: $\frac{1}{/4}$, 12,5 mm lang

G:	2	4	6	8	kp
----	---	---	---	---	----

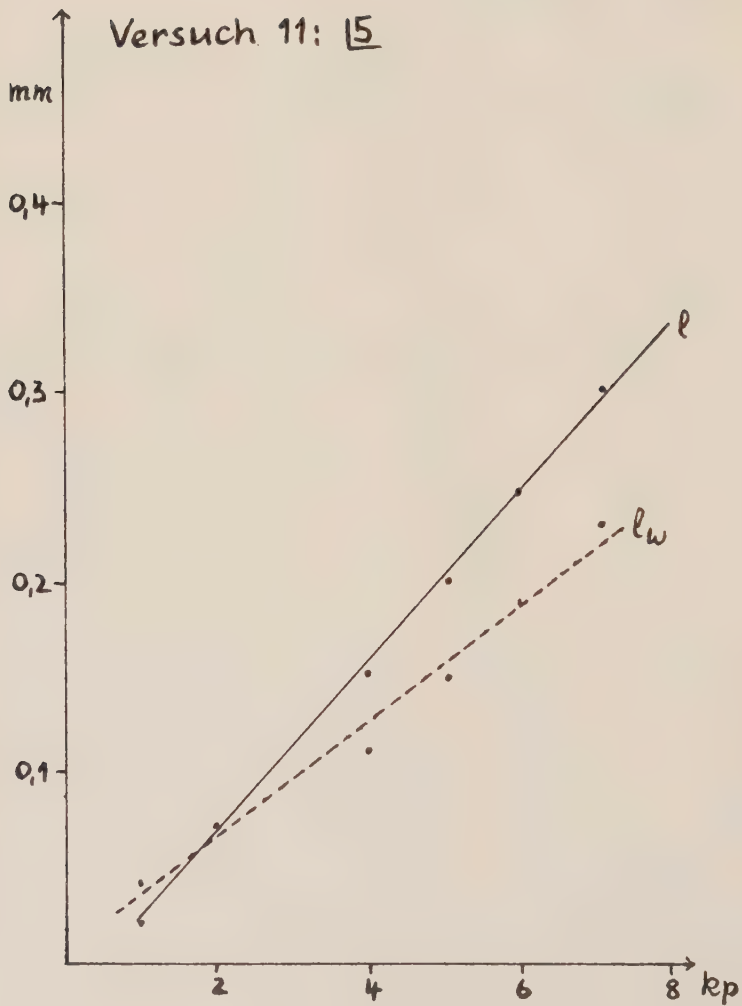
l:	0,03	0,06	0,10	0,14	mm
----	------	------	------	------	----

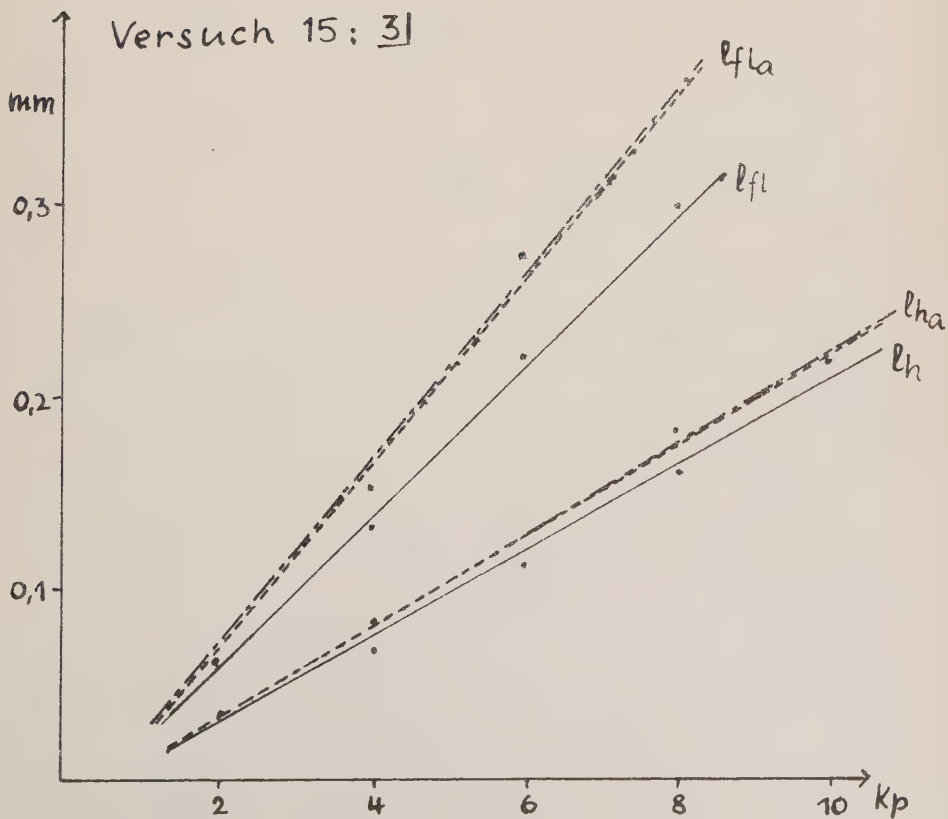
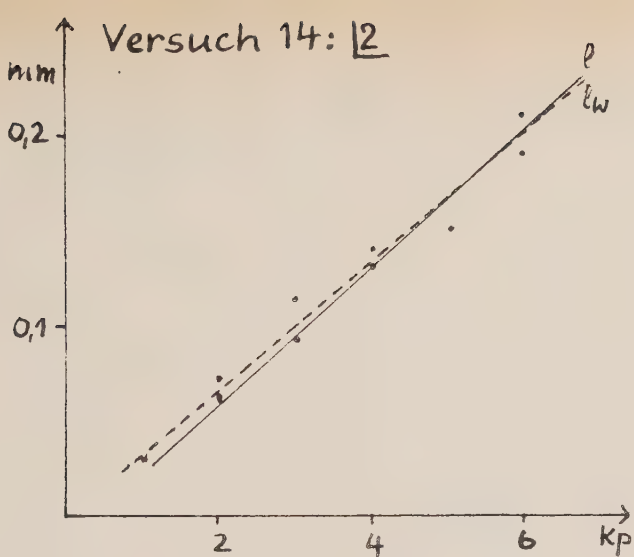
l _a :	0,02	0,05	0,08		mm
------------------	------	------	------	--	----

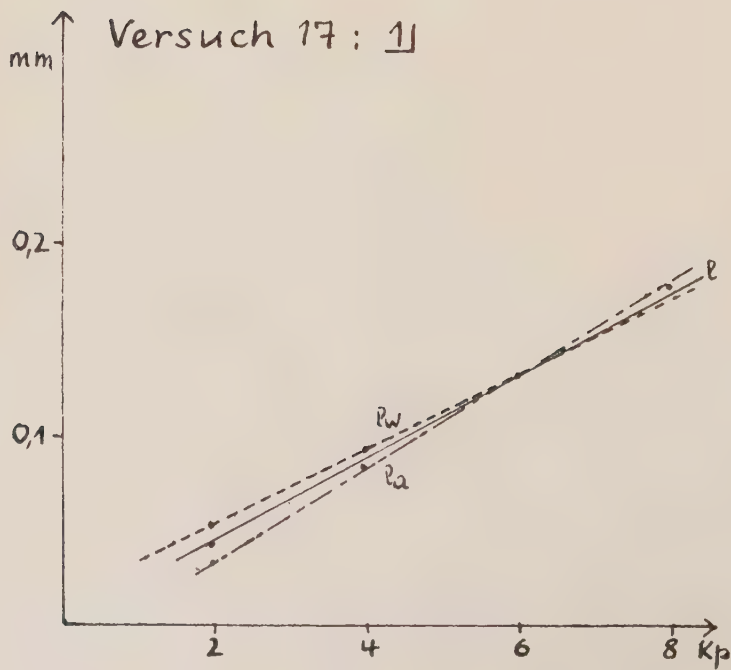
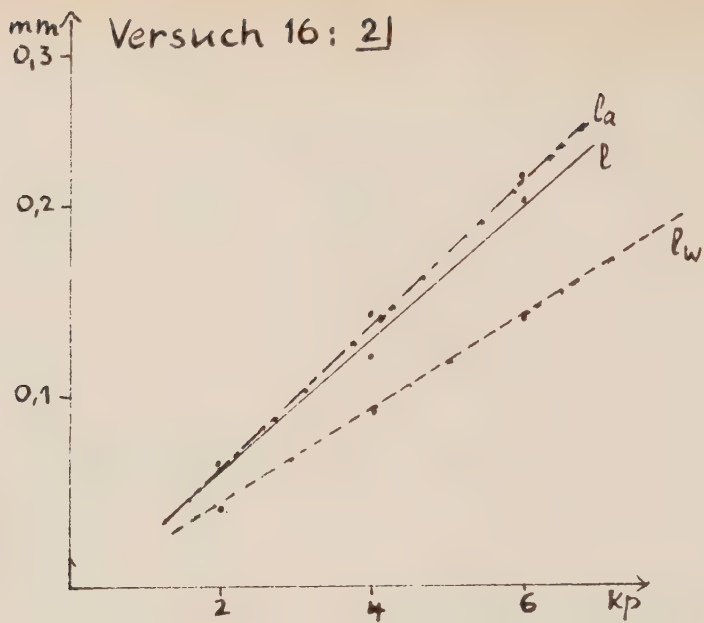
l _w :	0,04	0,06	0,08	0,11	mm
------------------	------	------	------	------	----

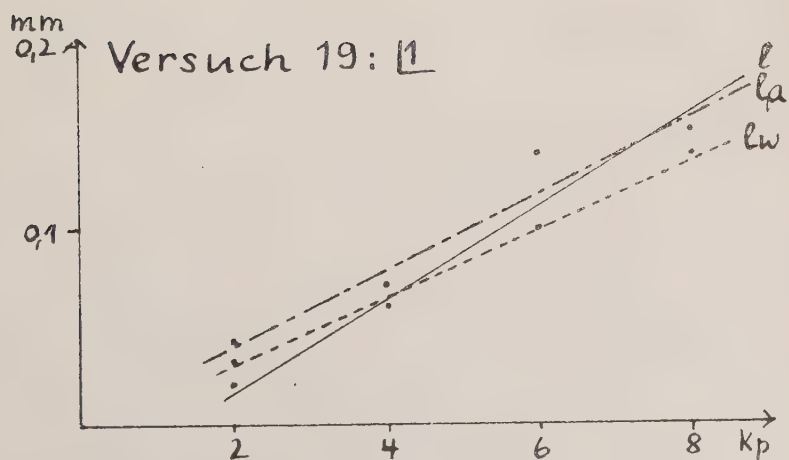
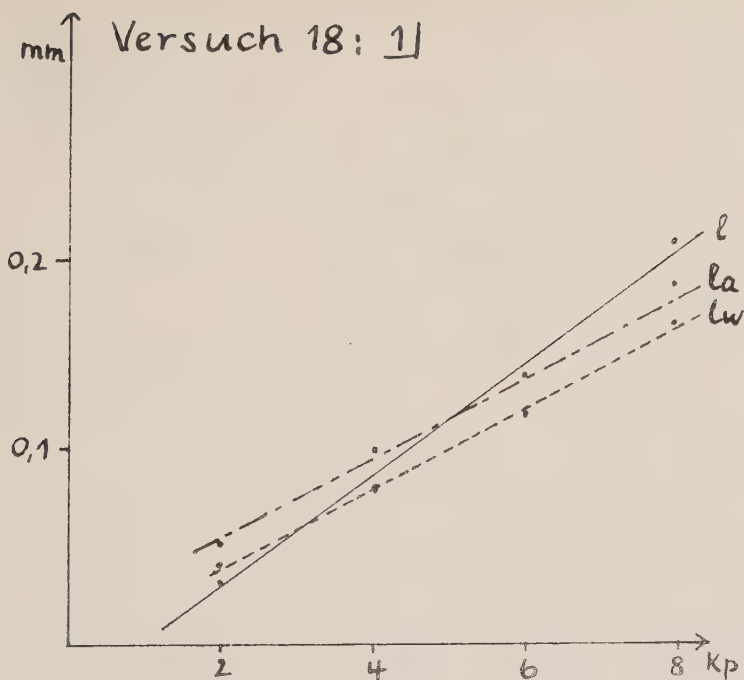


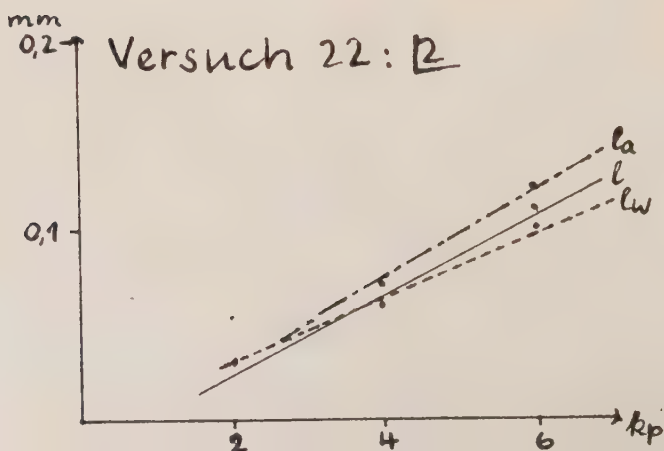
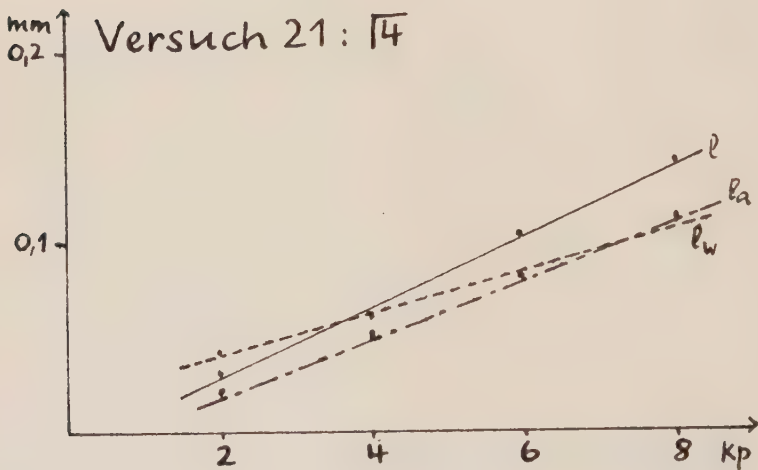
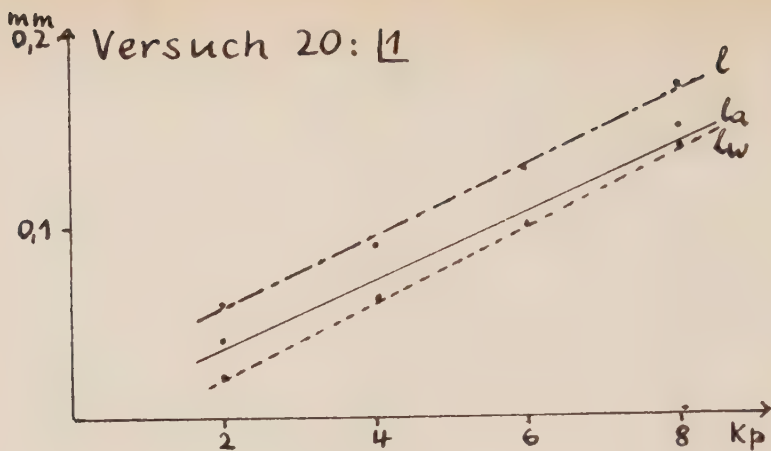
Versuch 11: 15











Versuch 22: $\frac{1}{2}$, 11,5 mm lang

G:	2	4	6				kp
l:	0,03	0,06	0,11				mm
l _a :	0,03	0,07	0,12				mm
l _w :	0,03	0,06	0,10				mm

Versuch 23: $\frac{3}{7}$, 14 mm lang

G:	2	4	6				kp
l _h :	0,05	0,11	0,18				mm
l _{fl} :	0,16	0,38					mm
l _{ha} :	0,07	0,14	0,20				mm
l _{fla} :	0,16	0,29					mm
l _{hw} :	0,08	0,16					mm

Auch hier beendete Fraktur den Versuch.

Versuch 24: $\frac{1}{3}$, 13 mm, Querschnitt rund

G:	2	4	6	8	10		kp
l:	0,03	0,06	0,10	0,15	0,17		mm
l _a :	0,03	0,06	0,10	0,14	0,15		mm
l _w :	0,04	0,08	0,11	0,16	0,20		mm

Auch hier konnte der Stift nicht sehr tief eingeführt werden.

Versuch 25: $\frac{4}{7}$, 13 mm lang

G:	2	4	6	8			kp
l:	0,03	0,09	0,15	0,21			mm
l _a :	0,06	0,12	0,19	0,28			mm
l _w :	0,06	0,12	0,19	0,28			mm

Versuch 26: $\frac{2}{7}$, 13 mm lang

G:	2	4	6	8			kp
l:	0,06	0,16	0,28				mm
l _a :	0,08	0,18					mm

Fraktur beendete den Versuch.

Versuch 27: $\frac{5}{7}$, 14,5 mm lang

G:	2	4	6				kp
l:	0,06	0,16	0,39				mm
l _a :	0,08	0,19	0,32				mm
l _w :	0,06	0,14	0,25				mm

Versuch 28: $\frac{1}{1}$, 13,5 mm lang

G:	2	4	6	8	kp
l:	0,02	0,06	0,10	0,16	mm
l _a :	0,05	0,07	0,11	0,19	mm
l _w :	0,03	0,06	0,10	0,15	mm

Versuch 29: $\frac{3}{1}$, 17 mm lang

G:	2	4	6	8	kp
l _h :	0,03	0,08	0,10	0,18	mm
l _{fl} :	0,06	0,15	0,26		mm
l _{h_a} :	0,03	0,05	0,08	0,11	mm
l _{fl_a} :	0,08	0,18	0,27		mm
l _{h_w} :	0,02	0,06	0,10	0,15	mm
l _{fl_w} :	0,07	0,15	0,23		mm

Versuch 30: $\frac{5}{1}$, 13 mm lang

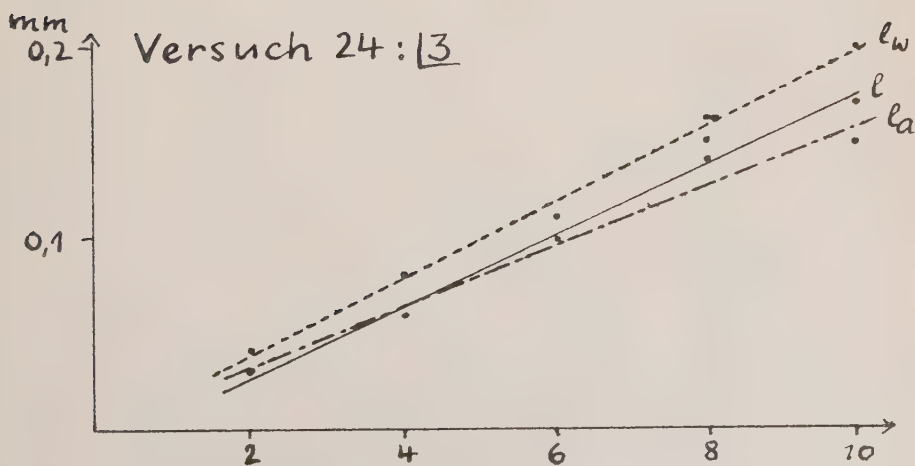
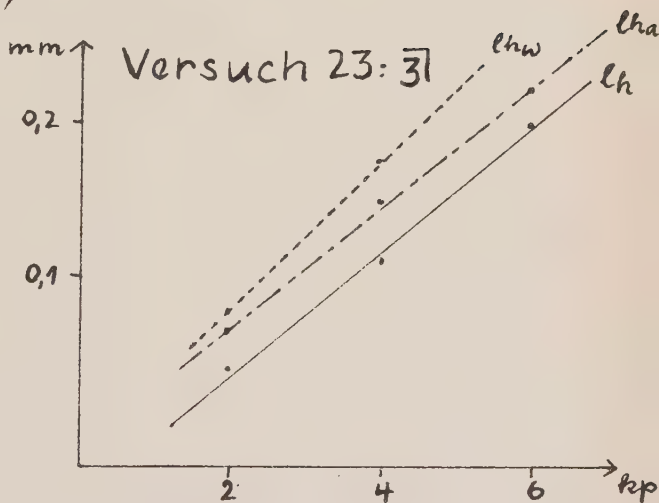
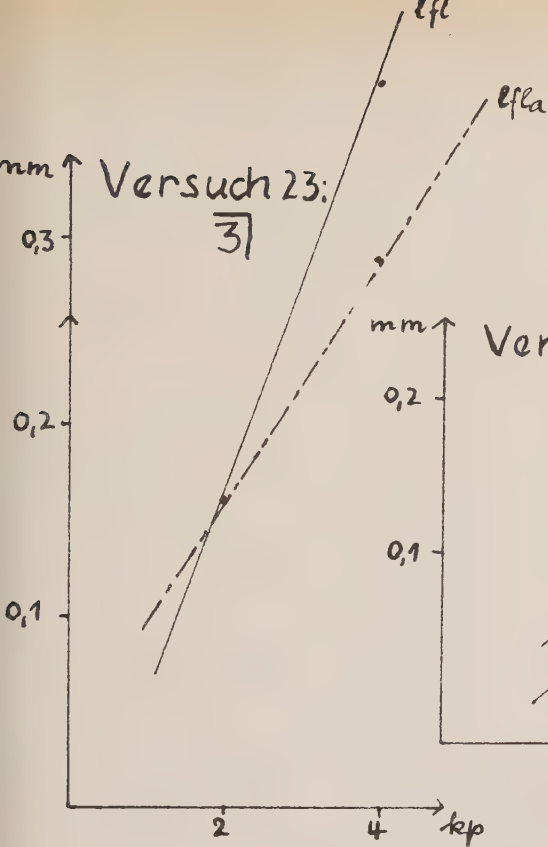
G:	2	4	6	8	kp
l:	0,02	0,04	0,07	0,11	mm
l _a :	0,02	0,05	0,07	0,11	mm
l _w :	0,02	0,04	0,06	0,09	mm

Versuch 31: $\frac{1}{4}$, 14 mm lang

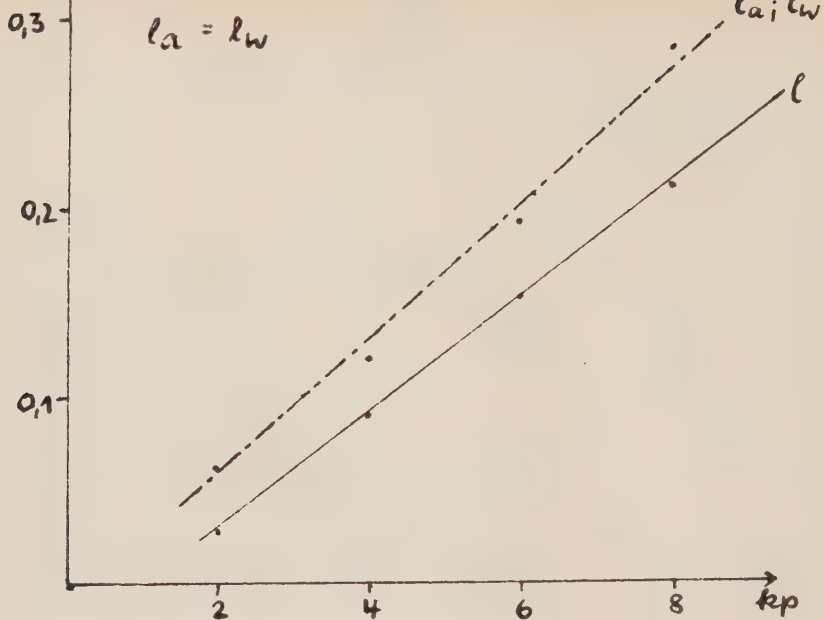
G:	2	4	6	8	kp
l:	0,02	0,06	0,10	0,15	mm
l _a :	0,02	0,06	0,10	0,14	mm
l _w :	0,03	0,07	0,10	0,15	mm

Versuch 32: $\frac{3}{1}$, 15,5 mm lang

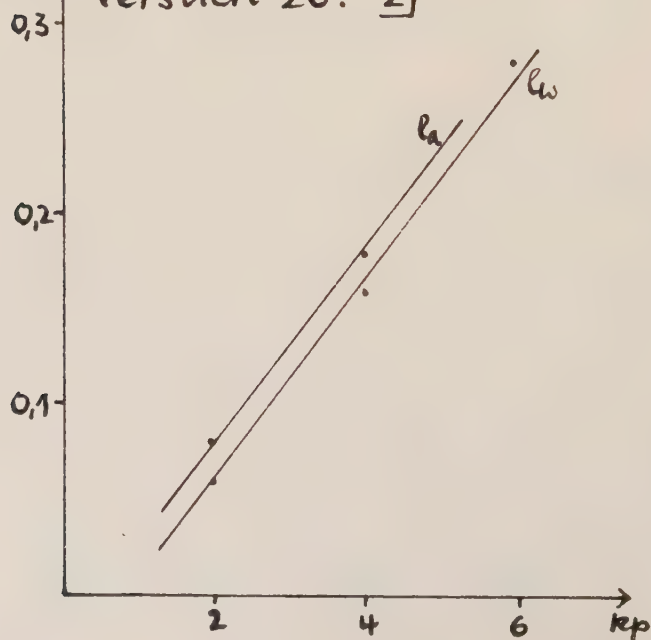
G:	2	4	6	8	kp
l _h :	0,07	0,12	0,19	0,27	mm
l _{fl} :	0,10	0,27			mm
l _{h_a} :	0,06	0,11	0,17	0,23	mm
l _{fl_a} :	0,11	0,25			mm
l _{h_w} :	0,07	0,15	0,21	0,29	mm
l _{fl_w} :	0,16	0,38			mm

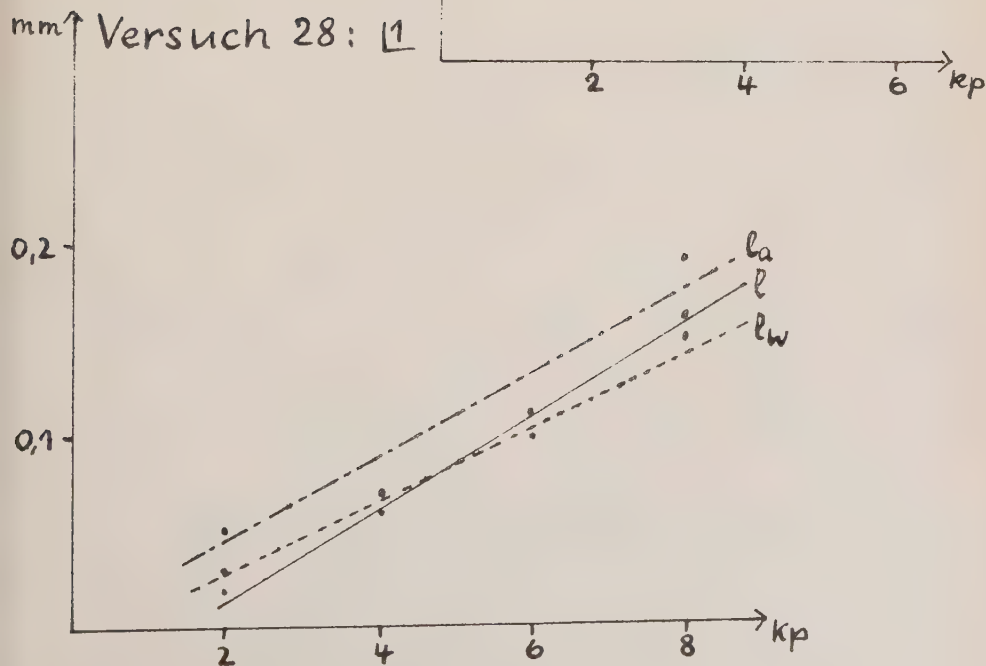
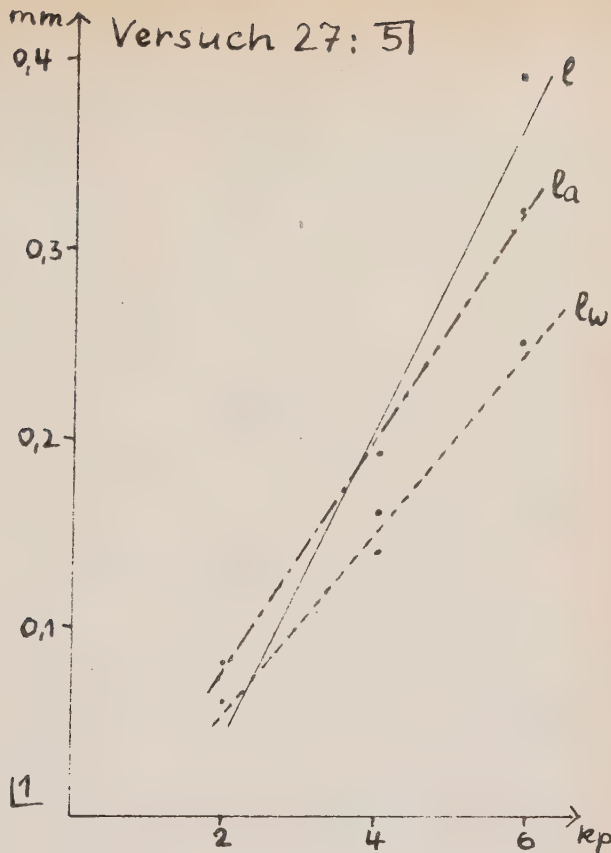


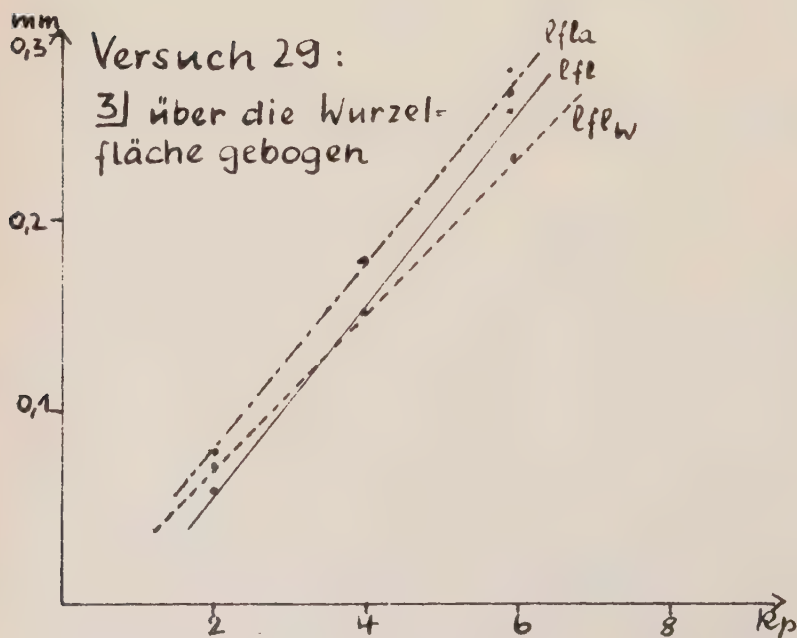
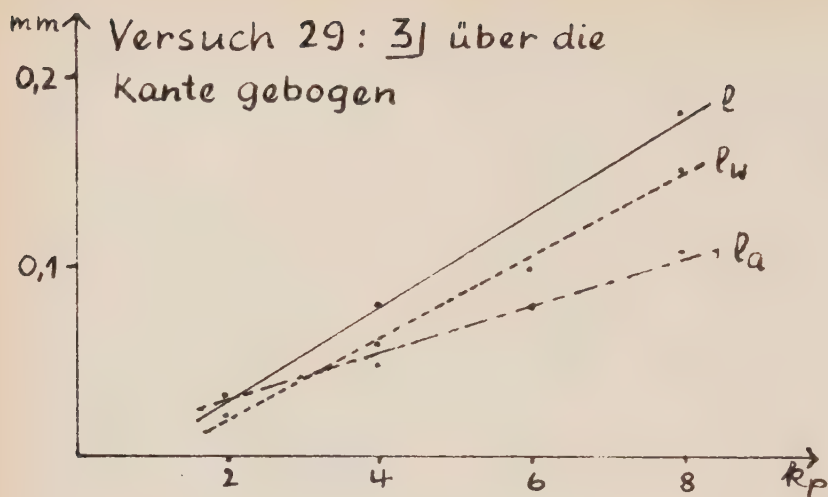
mm Versuch 25: 4



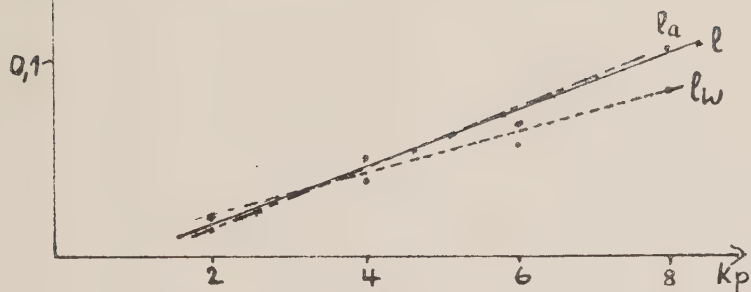
mm Versuch 26: 2



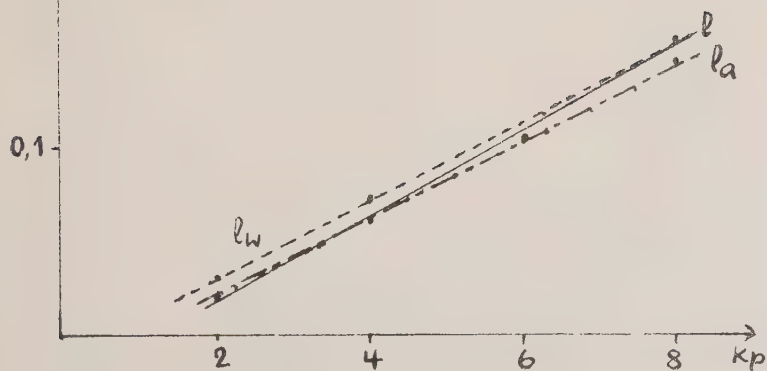


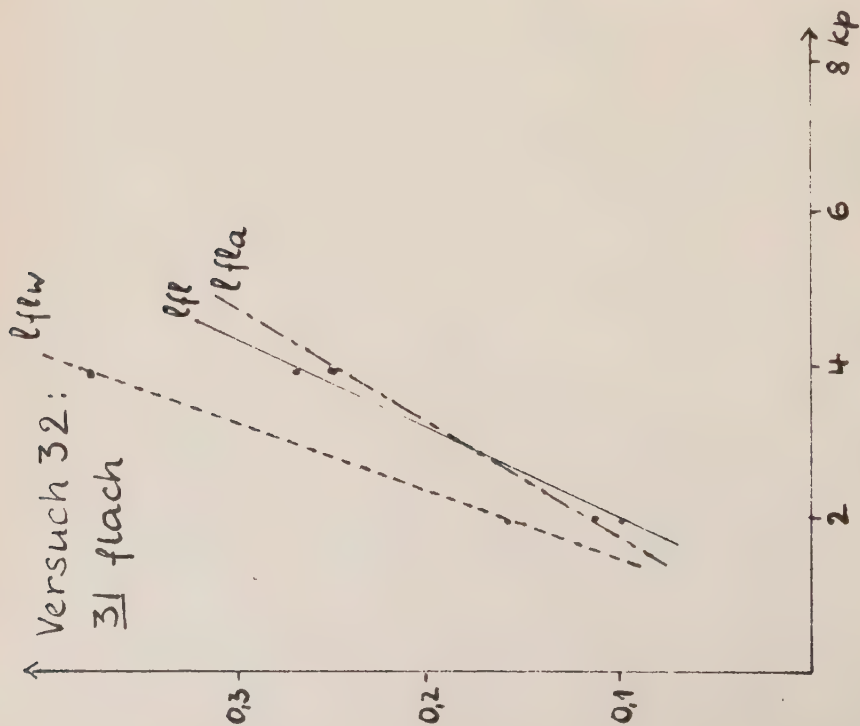
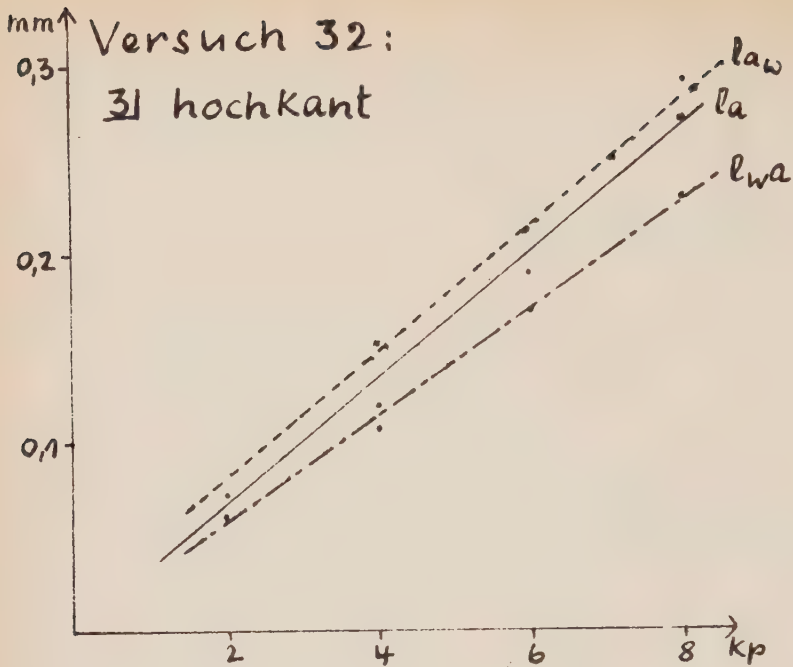


mm Versuch 30: $\overline{5}$



mm Versuch 31: $\overline{14}$





Versuch 33: $\underline{3/}$, 17 mm lang

G:	2	4	6	8	kp
l_h :	0,03	0,05	0,10	0,14	mm
l_{fl} :	0,07	0,18	0,27		mm
l_{ha} :	0,02	0,07	0,12	0,17	mm
l_{fla} :	0,06	0,14	0,21		mm
l_{hw} :	0,03	0,06	0,10	0,13	mm
l_{flw} :	0,06	0,13	0,19		mm

Versuch 34: $\underline{2/}$, 14 mm lang

G:	2	4	6	kp
l :	0,06	0,12	0,20	mm
l_a :	0,06	0,14	0,22	mm
l_w :	0,05	0,10	0,17	mm

Versuch 35: $\underline{2/}$, 12 mm lang

G:	2	4	kp
l :	0,06	0,10	mm
l_a :	0,06	0,11	mm
l_w :	0,04	0,09	mm

Versuch 36: $\overline{4/}$, 12,5 mm lang

G:	2	4	6	8	kp
l :	0,04	0,08	0,12	0,19	mm
l_a :	0,05				mm

Fraktur

Versuch 37: $\underline{1/}$, 13 mm lang

G:	2	4	6	8	kp
l :	0,05	0,10	0,15	0,19	mm
l_a :	0,04	0,09	0,14	0,19	mm
l_w :	0,04	0,09	0,13	0,19	mm

Versuch 38: $\frac{1}{3}$, 16 mm lang

G:	2	4	<u>6</u>	8	kp
l _h :	0,03	0,11	0,21	0,32	mm
l _{fl} :	0,11	0,27	0,48		mm
l _{ha} :	0,05	0,12	0,21	0,30	mm
l _{fla} :	0,13	0,26	0,37		mm
l _{hw} :	0,05	0,11	0,19	0,28	mm
l _{flw} :	0,11	0,24	0,42		mm

Versuch 39: $\frac{1}{3}$

G:	2	4	<u>6</u>	8	kp
l _h :	0,04	0,08	0,15	0,23	mm
l _{fl} :	0,08	0,18	0,28		mm
l _{ha} :	0,07	0,15	0,22	0,31	mm
l _{fla} :	0,09	0,19			mm

Fraktur

Versuch 40: $\frac{1}{4}$

G:	2	4	<u>6</u>	8	kp
l:	0,04	0,10	0,15	0,22	mm
l _a :	0,08	0,16			mm

Fraktur

Versuch 41: $\frac{1}{4}$, 15 mm lang

G:	2	4	<u>6</u>	8	kp
l:	0,04	0,08	0,13	0,15	mm
l _a :	0,05	0,10	0,16	0,23	mm
l _w :	0,05	0,10	0,15	0,20	mm

Versuch 42: $\frac{1}{2}$, 16 mm lang

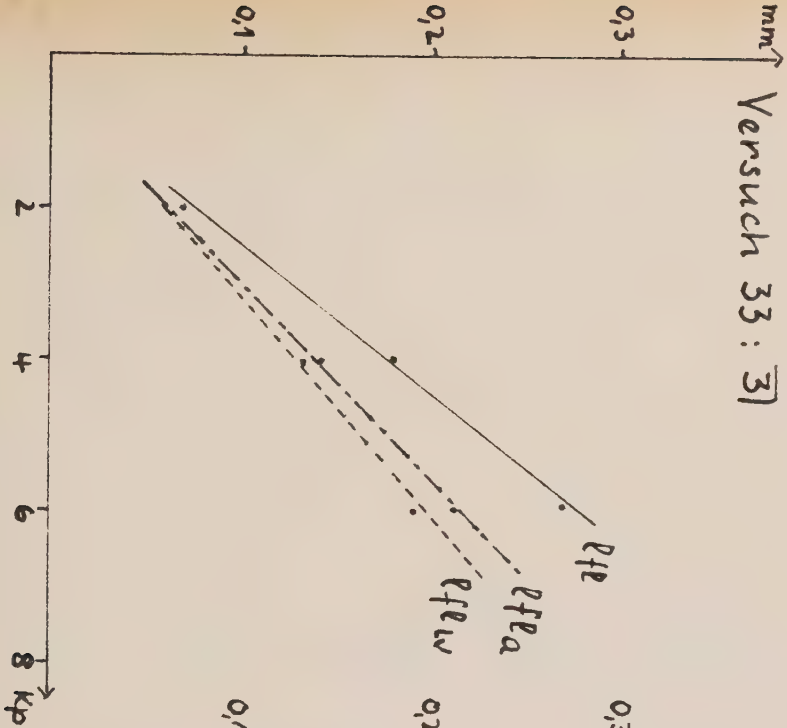
G:	2	4	<u>6</u>		kp
l:	0,07	0,19	0,36		mm
l _a :	0,10	0,24	0,39		mm
l _w :	0,08	0,19	0,31		mm

Versuch 43: $\frac{1}{4}$, 9 mm lang

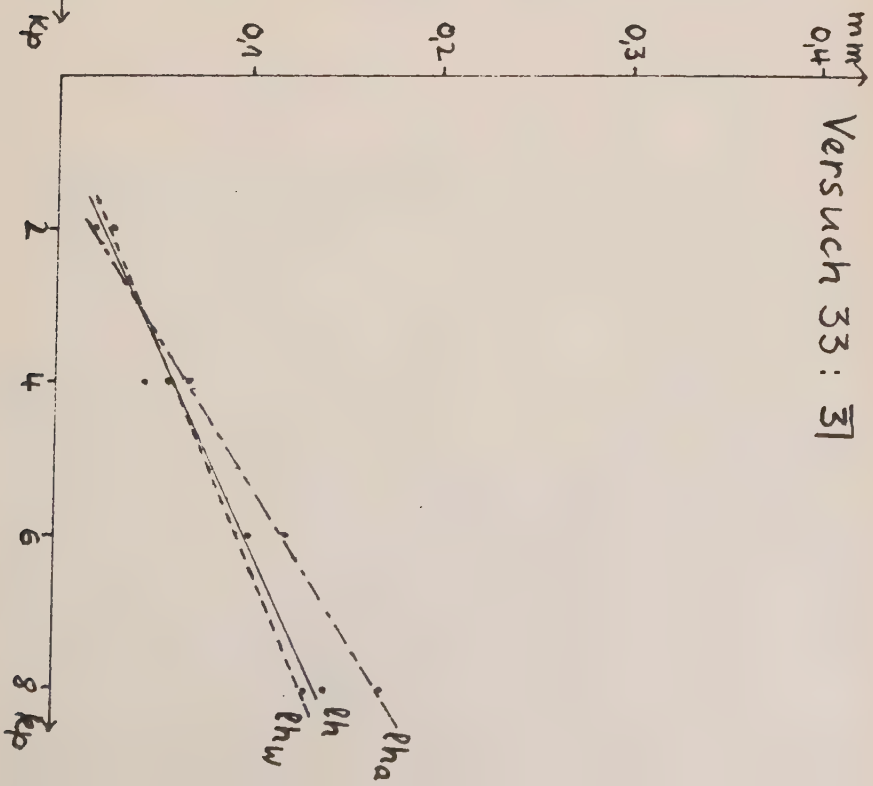
G:	2	4	<u>6</u>	8	kp
l:	0,03	0,07	0,11	0,15	mm

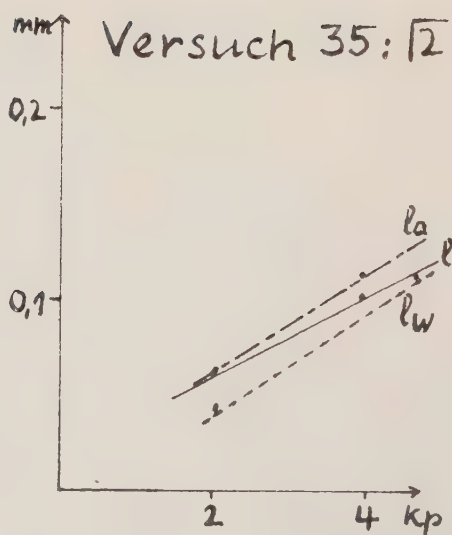
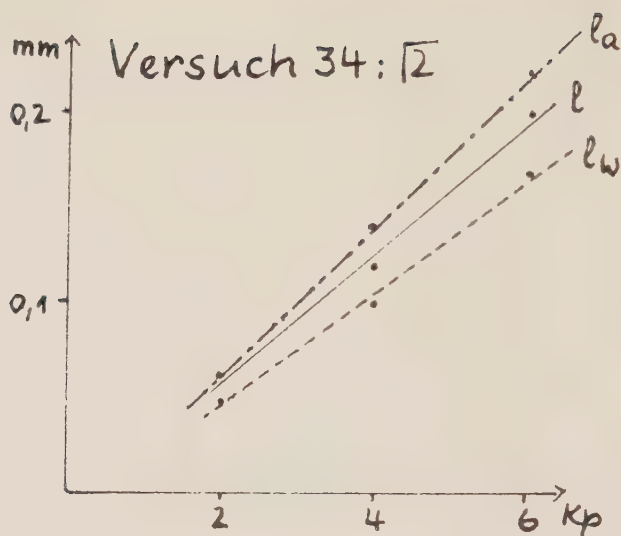
Fraktur

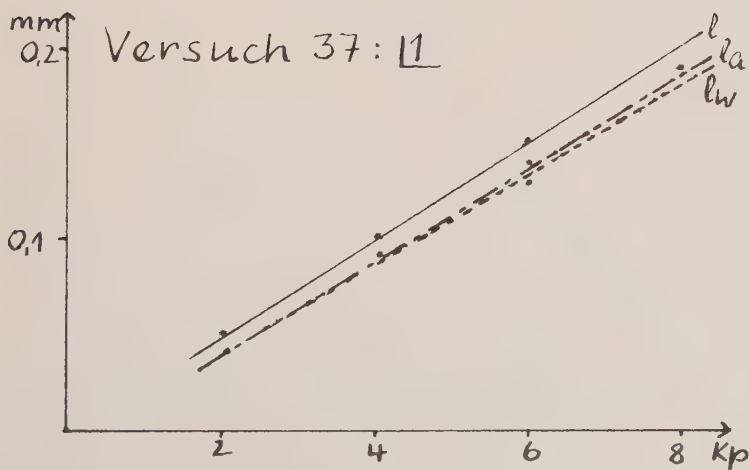
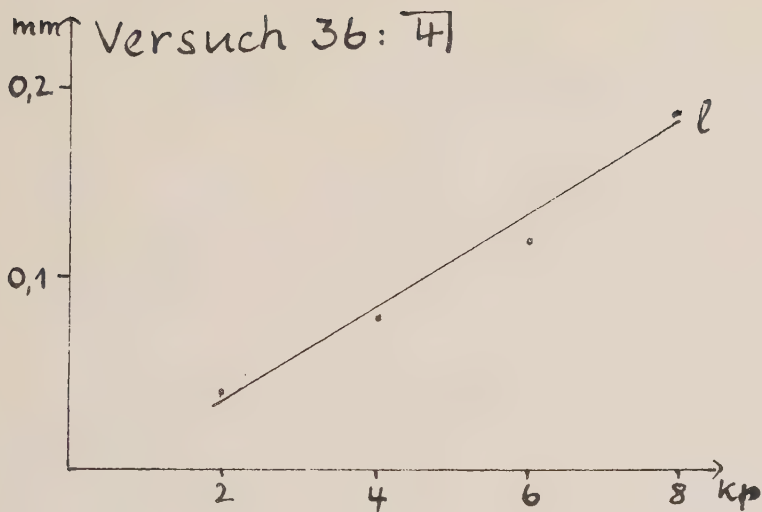
Versuch 33: 3]



Versuch 33: 3]







mm ↑ Versuch 38: 13

0,4

0,3

0,2

0,1

2

4

6

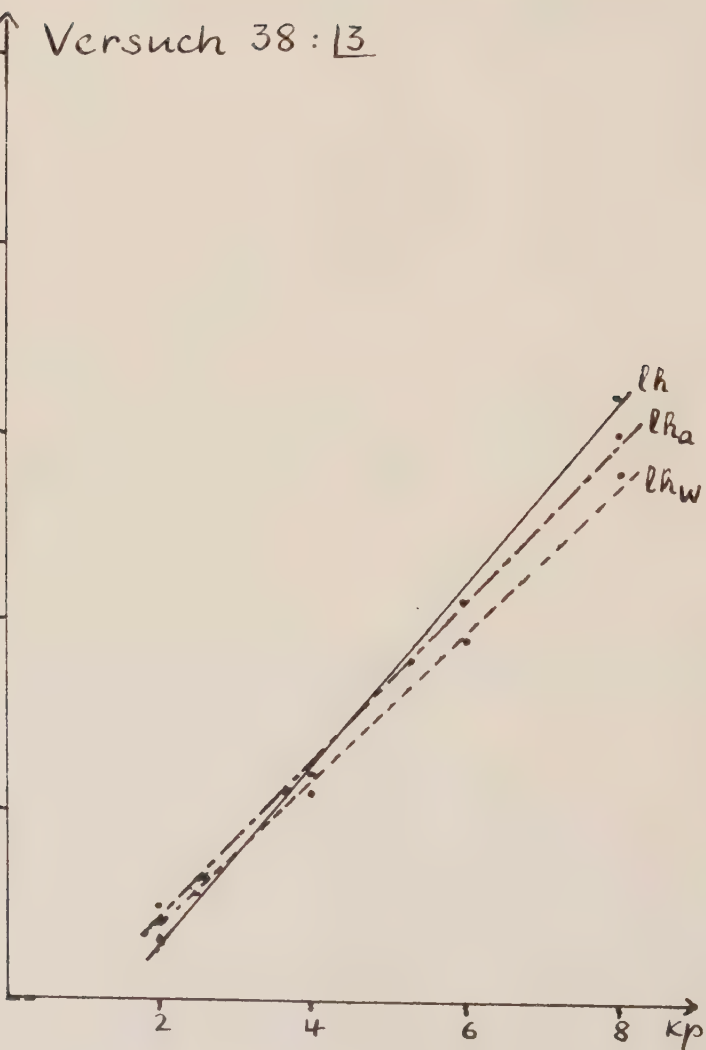
8

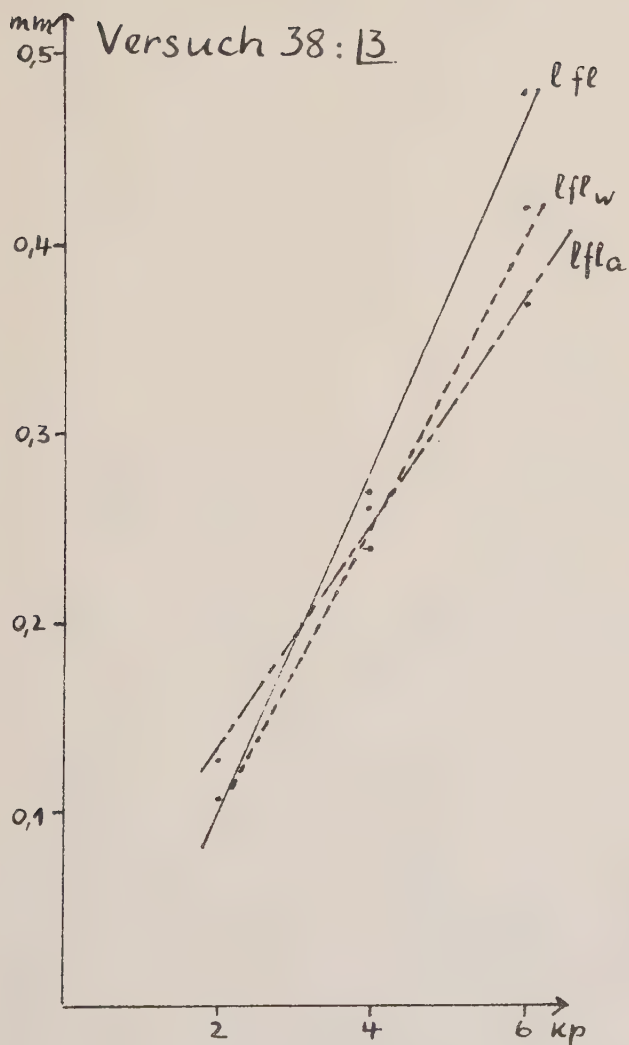
Kp

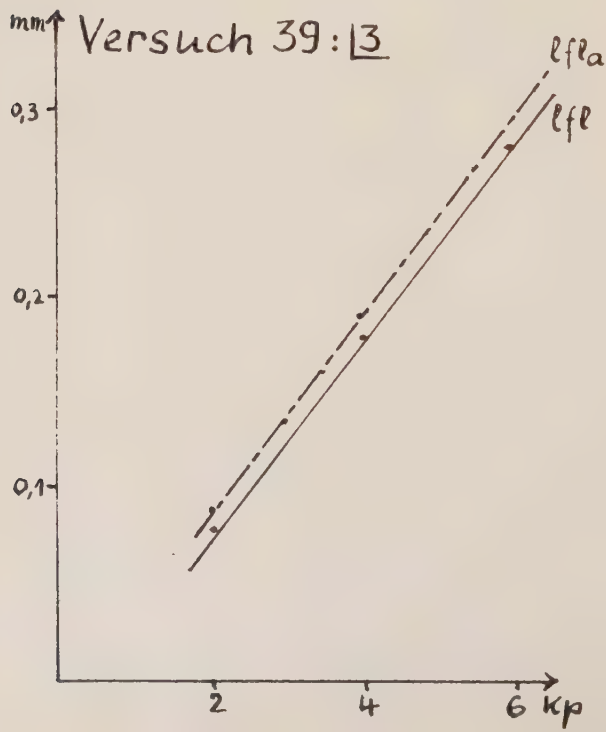
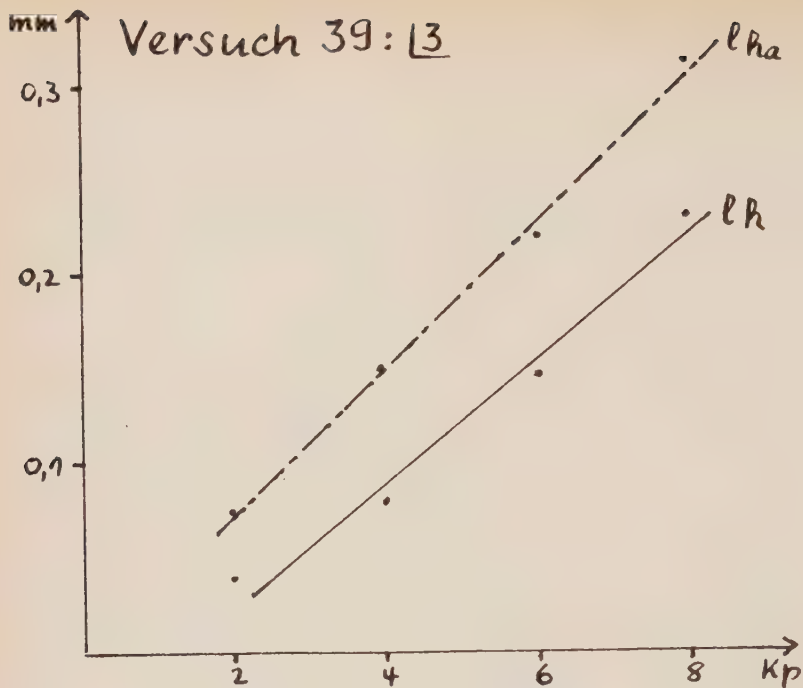
lh

lha

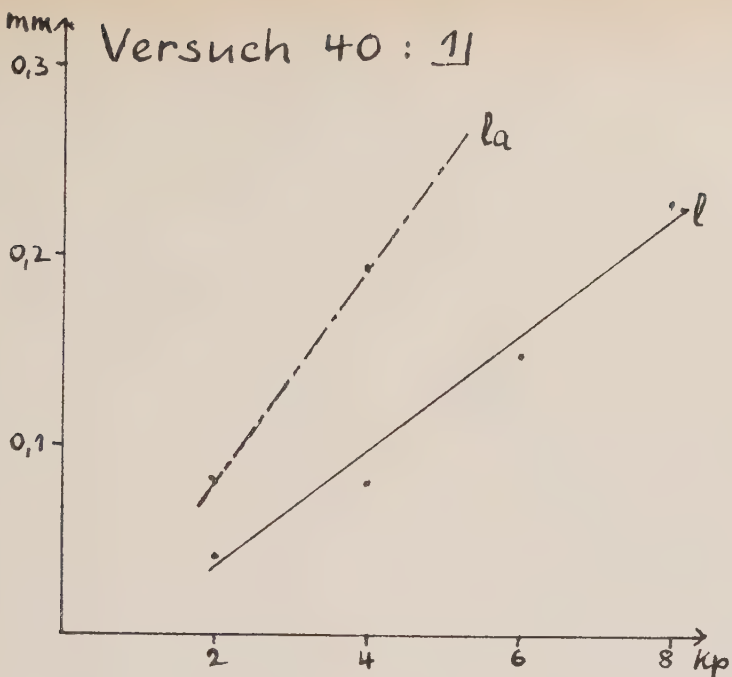
lhw



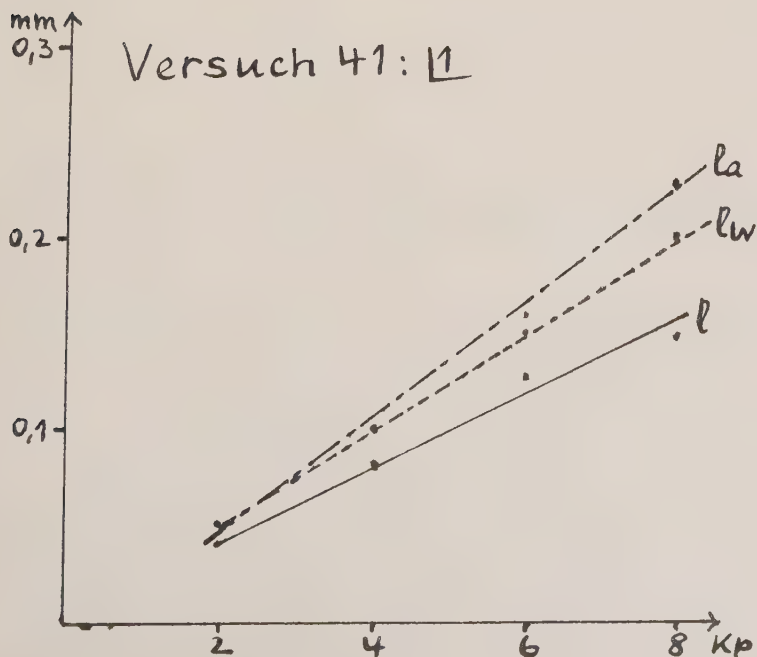


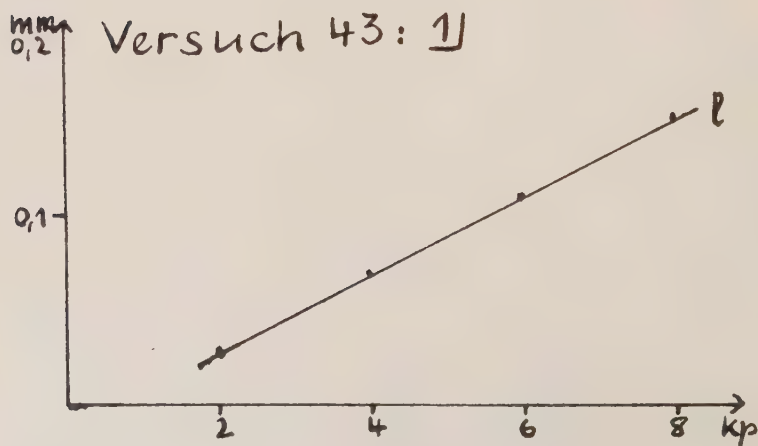
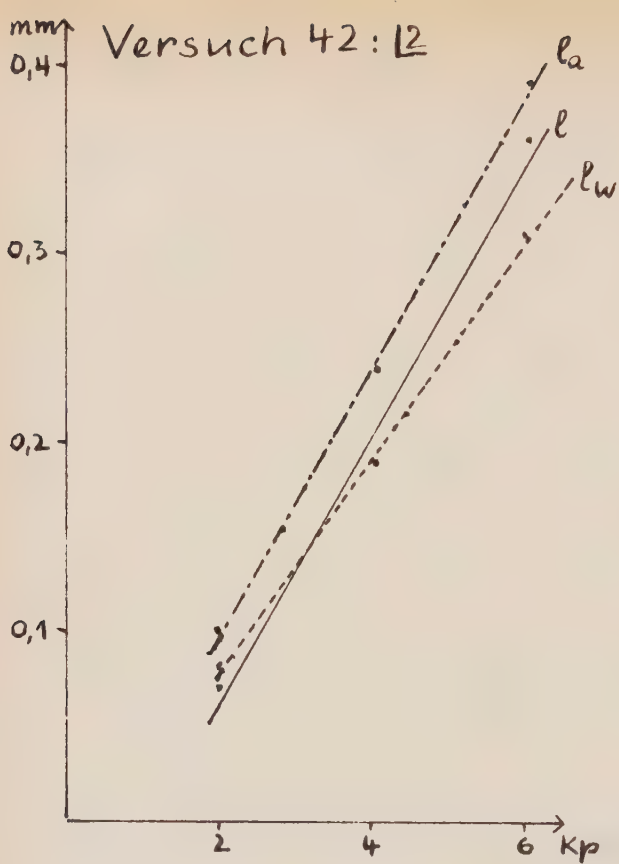


Versuch 40: 1



Versuch 41: 1





Versuch 44: 3/, 14 mm lang, impaktierter Zahn

G:	2	4	6	8	10	kp
l _h :	0,02	0,02	0,04	0,06	0,08	mm
l _{fl} :	0,02	0,05	0,07	0,10		mm
l _{h_a} :	0,01	0,02	0,03	0,05	0,06	mm
l _{fl_a} :	0,03	0,06	0,08	0,11		mm
l _{h_w} :	0,01	0,02	0,04	0,06	0,08	mm
l _{fl_w} :	0,03	0,06	0,09	0,10		mm

Versuch 45: 2/, 16 mm lang

G:	2	4	6	8	kp
l:	0,02	0,07	0,14	0,23	mm
l _a :	0,02	0,07	0,14	0,19	mm
l _w :	0,04	0,07	0,12	0,17	mm

Versuch 46: /3, 17 mm lang

G:	2	4	6	8	kp
l _h :	0,03	0,06	0,11	0,16	mm
l _{fl} :	0,08	0,19	0,33		mm
l _{h_a} :	0,04	0,07	0,12	0,17	mm
l _{fl_a} :	0,10	0,19	0,34		mm
l _{h_w} :	0,04	0,09	0,13	0,17	mm
l _{fl_w} :	0,08	0,18	0,27	0,38	mm

Versuch 47: 3/, 16 mm

G:	2	4	6	8	10	kp
l _h :	0,02	0,04	0,07	0,10	0,14	mm
l _{fl} :	0,05	0,10	0,16	0,23		mm
l _{h_a} :	0,03	0,06	0,10	0,12	0,16	mm
l _{fl_a} :	0,05	0,10	0,16	0,22		mm
l _{h_w} :	0,02	0,06	0,09	0,12		mm
l _{fl_w} :	0,05	0,10	0,15	0,21		mm

Versuch 48: /1, 9 mm lang

G:	2	4	6	8	kp
l:	0,01	0,02	0,04	0,06	mm
l _a :	0,02	0,03	0,05	0,07	mm
l _w :	0,02	0,03	0,05	0,06	mm

Versuch 49: $\frac{1}{\quad}$, 11 mm lang

G:	2	4	6	8	kp
l:	0,03	0,06	0,12	0,20	mm
l _a :	0,03	0,06	0,10	0,15	mm
l _w :	0,02	0,06	0,09	0,12	mm

Versuch 50: $\frac{3}{\quad}$, 21 mm lang

G:	2	4	6	8	10	kp
l _h :	0,05	0,10	0,17	0,26	0,35	mm
l _{fl} :	0,11	0,26	0,41			mm
l _{h_a} :	0,10	0,19	0,31	0,43	0,57	mm
l _{fl_a} :	0,08	0,19	0,27			mm
l _{h_w} :	0,05	0,10	0,16	0,23	0,31	mm
l _{fl_w} :	0,07	0,17	0,26	0,35		mm

Versuch 51: $\frac{1}{\quad}$, 16 mm lang

G:	2	4	6	8	kp
l:	0,04	0,10	0,16	0,21	mm
l _a :	0,04	0,09	0,15	0,20	mm
l _w :	0,04	0,08	0,12	0,16	mm

Versuch 52: $\frac{2}{\quad}$, 12 mm lang

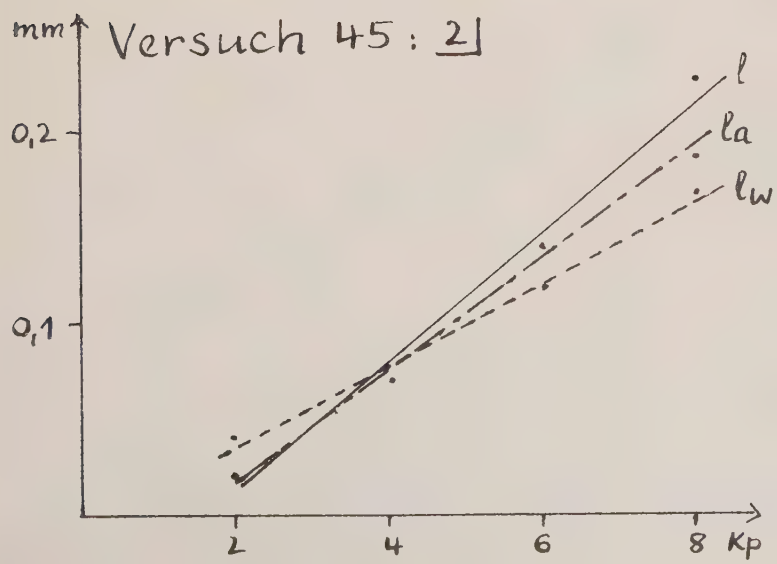
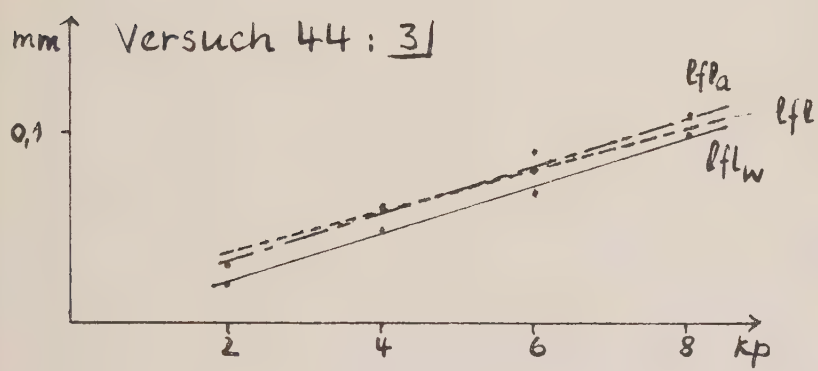
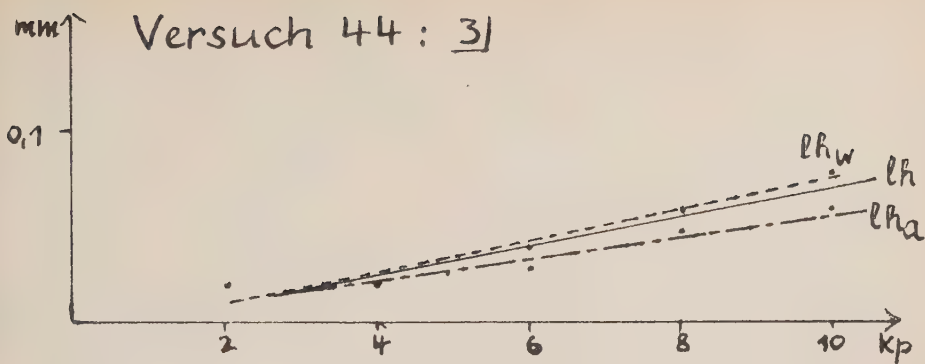
G:	2	4	6		kp
l:	0,02	0,06	0,10		mm
l _a :	0,02	0,04	0,06		mm
l _w :	0,03	0,05	0,07		mm

Versuch 53: $\frac{1}{\quad}$, 11 mm lang

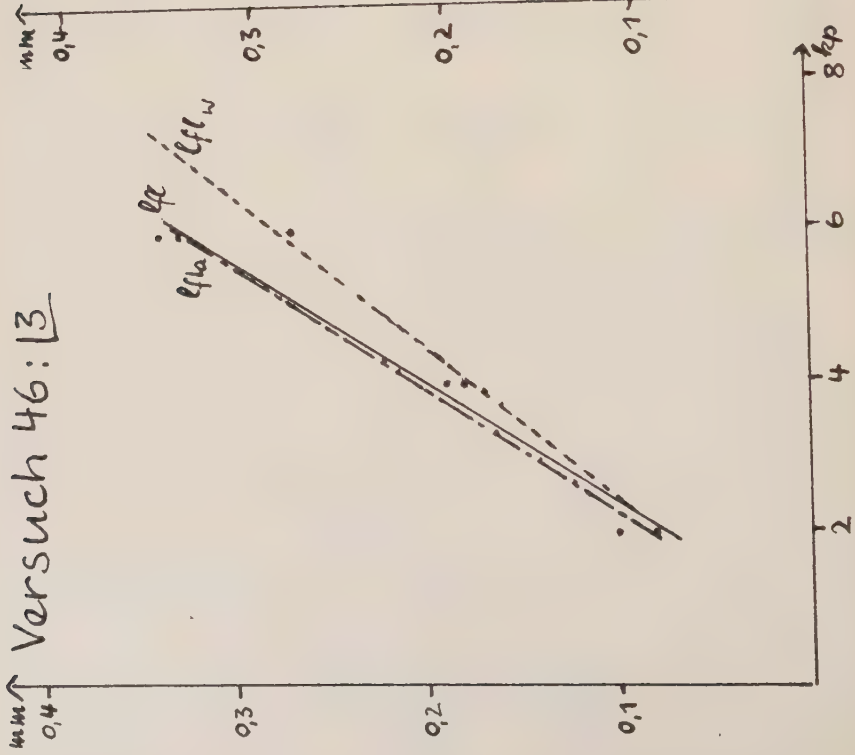
G:	2	4	6	8	kp
l:	0,03	0,09	0,11	0,18	mm
l _a :	0,03	0,08	0,15	0,24	mm
l _w :	0,02	0,06	0,15	0,23	mm

Versuch 54: $\frac{1}{\quad}$, 10 mm lang

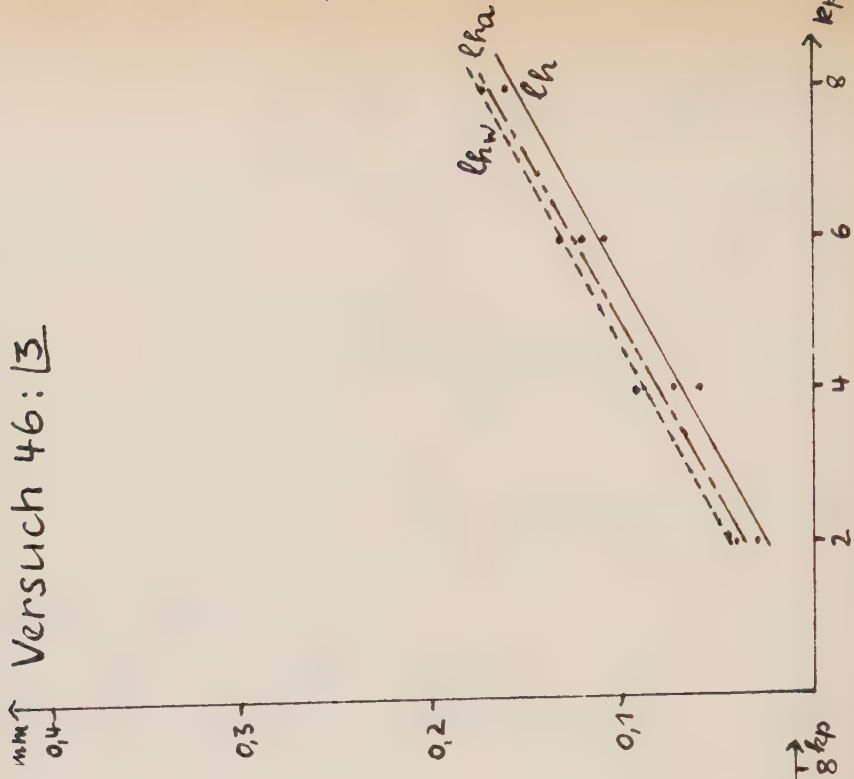
G:	2	4	6	8	kp
l:	0,01	0,03	0,05	0,08	mm
l _a :	0,02	0,03	0,09	0,11	mm
l _w :	0,02	0,04	0,06	0,09	mm

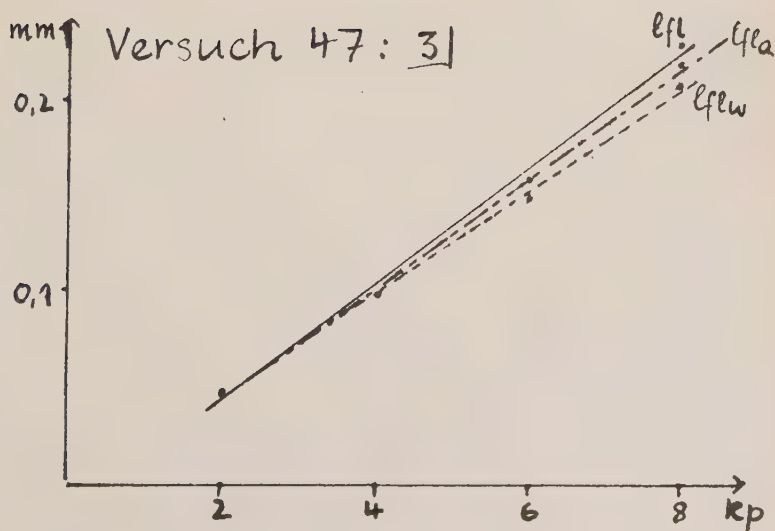
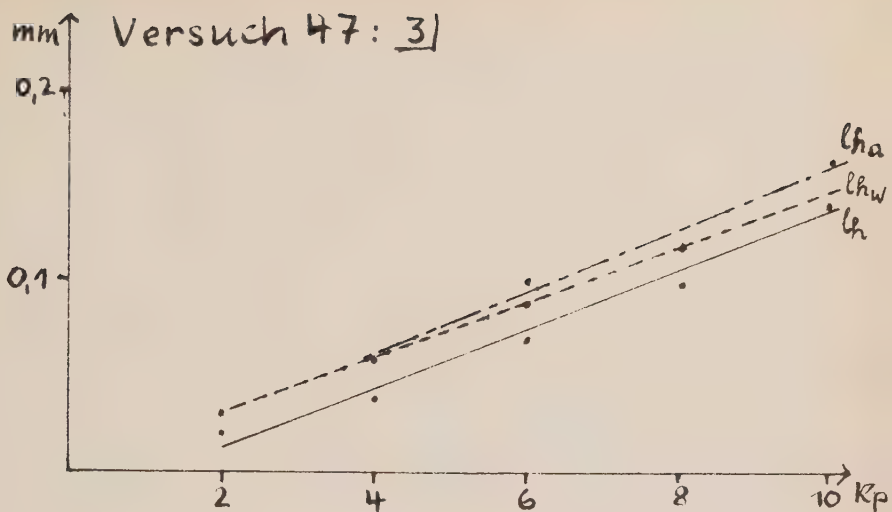


Versuch 46: 13



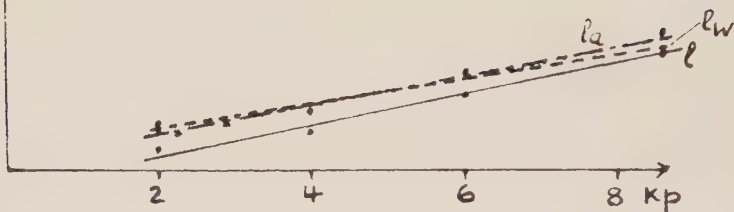
Versuch 46: 13





mm ↑ Versuch 48: 1

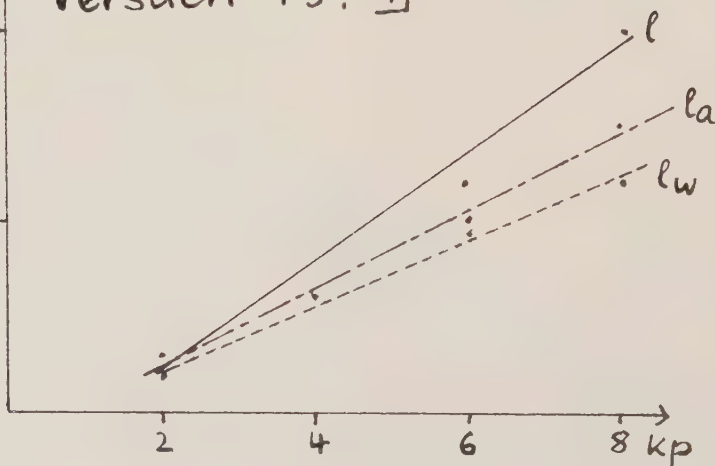
0,1



mm ↑ Versuch 49: 1

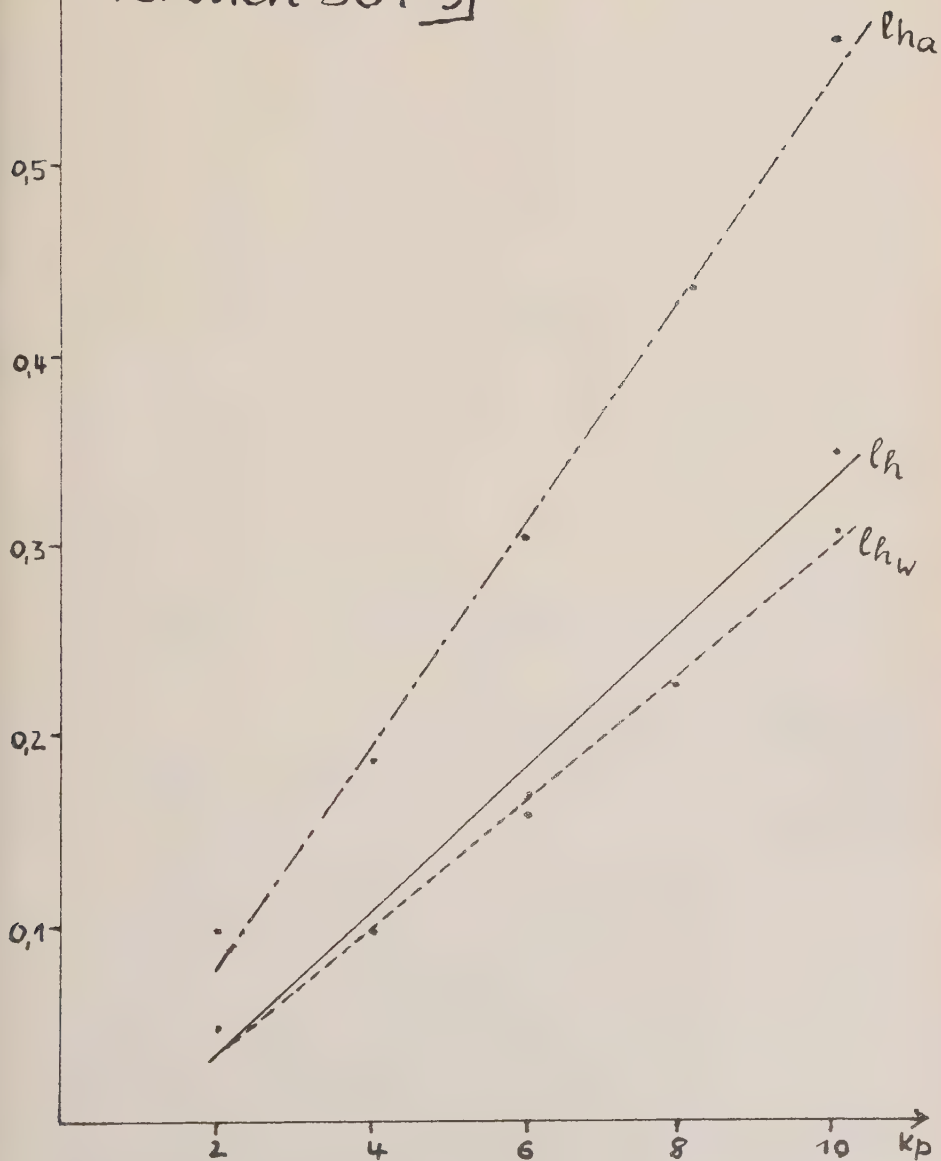
0,2

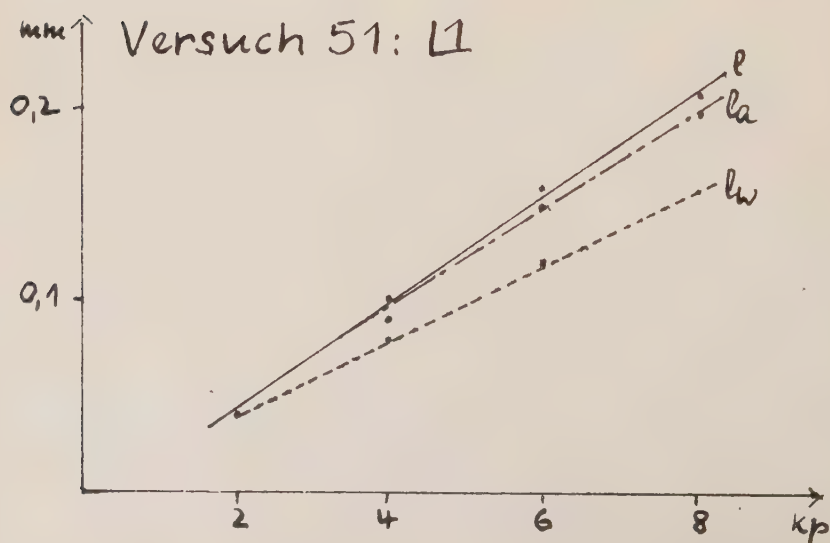
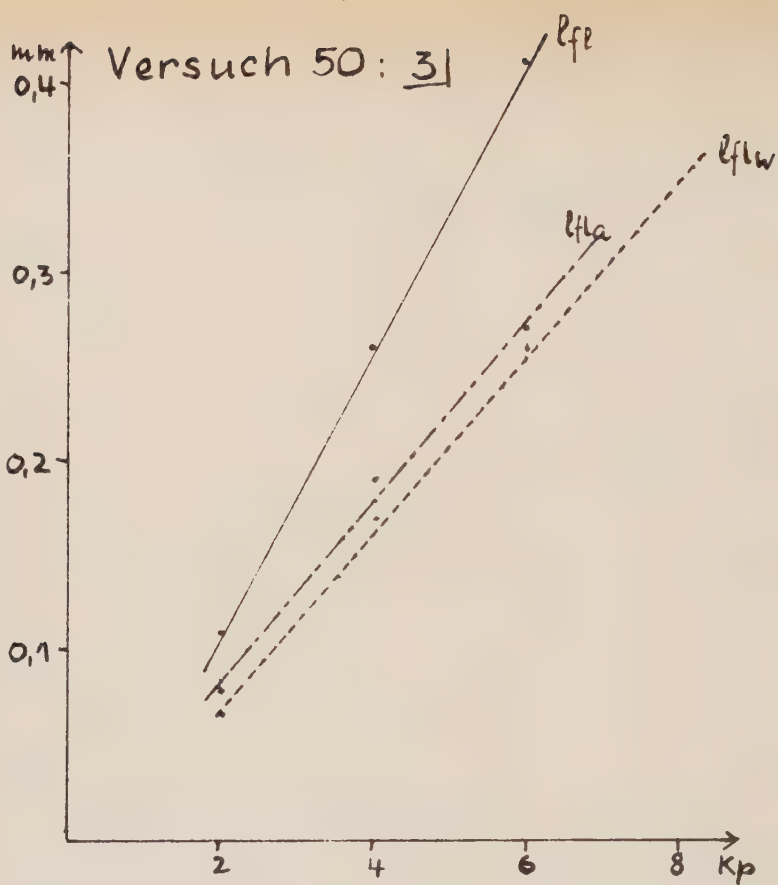
0,1



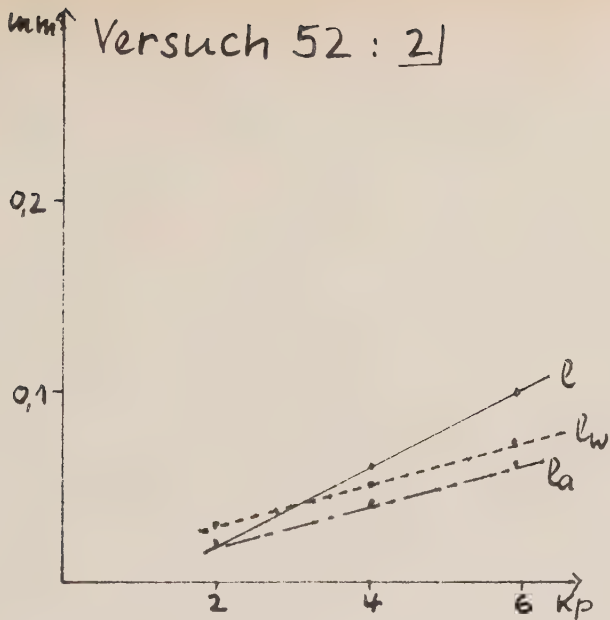
mm
0,6

Versuch 50: 3

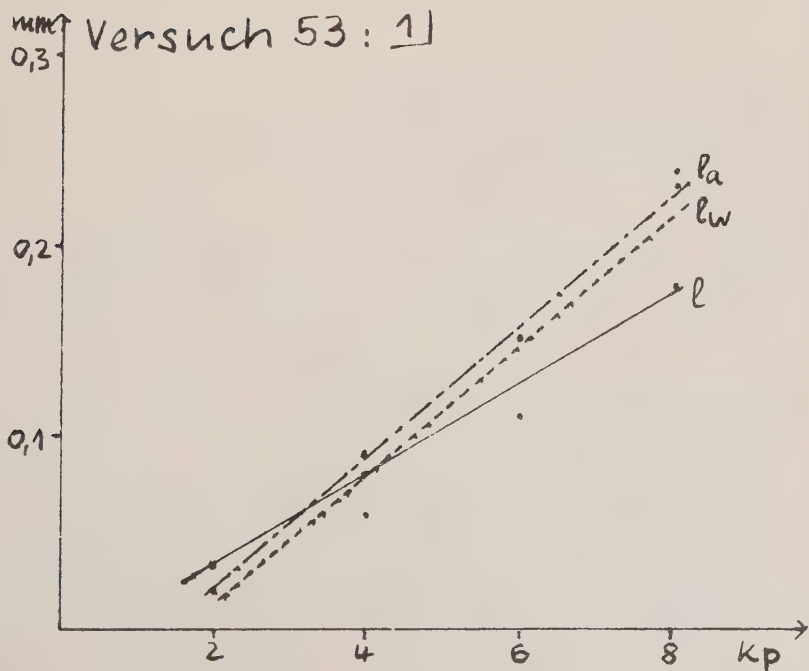


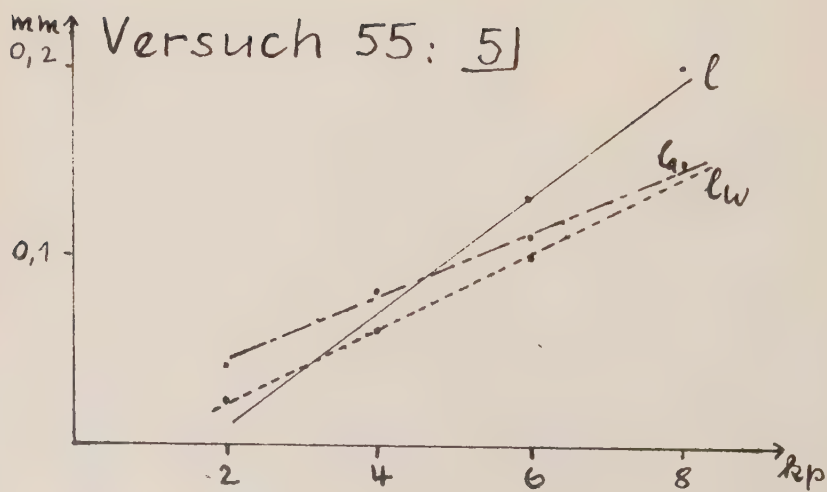
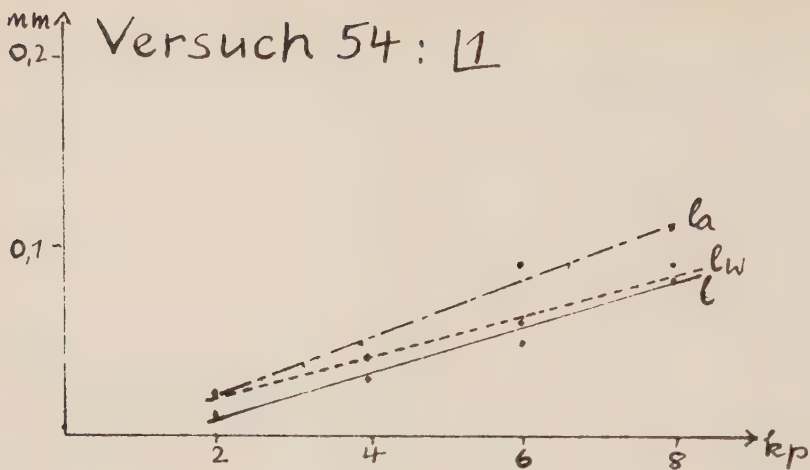


Versuch 52 : 2



Versuch 53 : 1





Versuch 55: 5 / 13,5 mm lang

G:	2	4	6	8	kp
l:	0,02	0,06	0,13	0,20	mm
l _a :	0,04	0,08	0,11		mm
l _w :	0,02	0,06	0,10	0,15	mm

VII. ZUR AUSWERTUNG

Diese Ergebnisse wurden wie folgt gewonnen:

Im Okularmikrometer wurde die dem Teilstrich, mit dem sich der Rand der Millernadel deckte, zugeordnete Zahl abgelesen und von der entsprechenden, beim völlig unbelasteten Zahn gewonnenen Zahl subtrahiert.

Diese Differenz wurde durch das Abbildungsverhältnis dividiert.

Eine Strecke von 1 mm wurde durch das Mikroskop so abgebildet, daß sie 62 Teilstrichen des Okularmikrometers entsprach.

Dieses Abbildungsverhältnis von 62 : 1 erlaubte, die gewünschte Strecke in Millimetern anzugeben.

Bei dieser Division wurden nur die zwei ersten Stellen nach dem Komma berücksichtigt. Eine Angabe der dritten Stelle erfordert eine genauere Ablesemöglichkeit, um zuverlässige Angaben zu erhalten. Eine Optik mit größerem Abbildungsmaßstab ermöglicht dies ohne Schwierigkeiten. Jedoch wurde im Hinblick auf die dann auch stärker in Erscheinung tretenden Meßfehler darauf verzichtet. Reproduzierbare Angaben über die dritte Stelle nach dem Komma, also $\frac{1}{1000}$ mm erfordern einen unverhältnismäßig größeren Aufwand. Alle früher diskutierten Fehlerquellen müssen betrachtet und in ihrer Auswirkung reduziert werden.

In bisher erschienenen Veröffentlichungen beschränken sich zudem die Autoren meistens darauf, nur 2 Dezimalstellen anzugeben. Da somit die Vergleichsmöglichkeit fehlt, ist es unnötig, genauer zu messen.

Die graphische Darstellung der Deformationen in Abhängigkeit von der Belastung erlaubt, auf einfache Weise Meßfehler auszugleichen.

Die aus den Tabellen gewonnenen Punkte bestimmen den Verlauf einer ausgleichenden Geraden, die so verläuft, daß gleich viele Meßpunkte möglichst

gleich weit über und unter der Geraden liegen. Nur sehr wenige Punkte weichen um mehr als $\frac{1}{100}$ mm, also die Fehlergrenze, von der Geraden ab.

Es erscheint also berechtigt, die Punkte durch Geraden zu verbinden. Solche Punkte, die höheren Belastungen entsprechen, könnten, weil sie meistens über der Geraden liegen, als Ausdruck dafür gelten, daß hier schon der Hoo-kes'sche Bereich der Proportionalität zwischen Kraft und Deformation überschritten ist. Die Kurve müßte also hier ein größeres Steigungsmaß annehmen; wegen der Geringfügigkeit der Steigerung jedoch ist bei der erreichten Meßgenauigkeit von $\pm 0,008$ mm keine exakte Aussage möglich.

Wie schon bei Mühlemann erwähnt, wird bei einer Belastung eines Zahnes senkrecht zu seiner Achse schon bei einer Kraft von 2 kp die Schmerzgrenze des Parodontiums erreicht. Normalerweise wird also diese Belastung nicht überschritten werden.

Wenn trotzdem die Messungen der elastischen Deformation der Wurzeln bis zu einer Belastung von 8, ja 10 kp ausgedehnt wurden, so geschah dies, um durch Extrapolieren den beim Ablesen kleiner Werte prozentual größeren Fehler zu verringern.

Darüber hinaus können die größeren Belastungswerte als Aussagen über das Verhalten der Zähne bei unphysiologischen Belastungen gelten.

Betrachtet man in den Diagrammen die Deformationen bei einer extraaxialen Belastung von 2 kp, so weichen in den meisten Fällen - 43 - die Deformationswerte der Zähne mit unausgeschachtetem Kanal von denen mit ausgeschachtetem und mit Wurzelstift versehenem Kanal um höchstens $\frac{2}{100}$ mm ab.

Dieser Wert liegt innerhalb der Höchstfehlergrenze der Meßapparatur. Er ist also nicht genauer zu bestimmen.

Die Veränderung der Deformierbarkeit beträgt weniger als 10% der durchschnittlichen Beweglichkeit eines Zahnes im Kiefer bei einer Belastung quer zu seiner Achse.

Bei den wenigen Versuchen, bei denen die ermittelten Werte um mehr als 0,02 mm differieren - 5 -, ist der Elastizitätsmodul des Zahnes sehr klein. Bei den dadurch größeren Deformationswerten fällt die Änderung des Elastizitätsmoduls ebenfalls wenig ins Gewicht.

Nun sollen noch einige Bemerkungen zu den Ergebnissen der einzelnen Versuche folgen.

Das Steigungsmaß jeder einzelnen Kurve wird bestimmt vom Elastizitätsmodul des Zahnes.

Schon beim flüchtigen Vergleichen der einzelnen Diagramme fällt auf, daß sich der Elastizitätsmodul nach dem Ausschachten und nach dem Einfügen des Wurzelstiftes nicht bei allen Versuchen im gleichen Sinne verändert hat.

Zwar ist ein einzelnes Wertepaar (Belastung und Deformation) und seine Veränderung durch die nachgeahmten zahnärztlichen Maßnahmen mit einem beträchtlichen prozentualen Meßfehler behaftet; wenn sich aber eine ganze Meßreihe im gleichen Sinne ändert, so daß die verbindende Gerade eine andere Steigung annimmt, darf man wohl als sehr wahrscheinliche Ursache dafür eine Änderung des Elastizitätsmoduls annehmen.

Es ergeben sich mehrere Typen von Ergebnissen, wenn man die Diagramme auf die Richtung der Veränderungen des Elastizitätsmoduls hin überprüft.

Nach dem Ergebnis der physikalischen Behandlung des Themas erwartet man, daß die Wurzel mit dem ausgeschachteten Kanal einen kleineren Elastizitätsmodul besitzt. Das bedeutet ein größeres Steigungsmaß. Ebenso sollte die mit einem einzementierten Stift versehene Wurzel einen größeren Elastizitätsmodul, also kleineres Steigungsmaß, aufweisen.

Zu demselben Ergebnis kommt man beim flüchtigen Nachdenken. Beim Ausschachten wird Material in der Nähe des Kanals entfernt, das vorher elastisch mitverformt wurde. Beim Einzementieren des Wurzelstiftes steigt der Elastizitätsmodul durch neu hinzukommendes Material.

Beim Aufbereiten des Kanales zum Entfernen der Pulpenreste kann man oft nicht vermeiden, daß das entstehende Kanallumen einen größeren Durchmesser bekommt, als es zur Aufnahme des Stiftes notwendig ist. Dasselbe gilt bei trichterförmig erweiterten Kanälen stark zerstörter Zähne. Hier muß notgedrungen der Zement als Füll-, nicht nur als Bindemittel dienen.

Auch bei nicht sehr exakt eingepaßtem Wurzelstift überträgt aber der Zement mit seiner großen Druckfestigkeit die Durchbiegung der Kanalwände auf den Stift. Dieser wird also derselben Verformung unterworfen wie die Wurzel selbst. Auch in diesem Fall wird man also eine Erhöhung des Elastizitätsmoduls erwarten.

Tatsächlich entspricht eine Anzahl von Meßergebnissen diesen Überlegungen. Bei diesen liegt die beim unversehrten Zahn gewonnene Meßreihe zwischen den Werten der Messungen nach den schon beschriebenen Maßnahmen. Die

Reihe, die für den Zahn mit ausgeschachtetem Kanal gilt, liegt darüber, die mit Wurzelstift gewonnene Reihe darunter.

Die Winkeldifferenz hängt von den Abmessungen des ganzen Systems Wurzel - Wurzelkanallumen - Stiftdurchmesser und -länge ab. Man kann darüber keine allgemeinen Aussagen machen.

Daher muß man zu diesem Typ auch diejenigen Versuche rechnen, bei denen die Werte der unversehrten Wurzel mit denen übereinstimmen, die mit Wurzelstift gewonnen wurden.

Zu diesem ersten Typ zählen die Versuche:

1 (hochkant), 3, 4, 5, 6, 9, 11, 14, 15, 16, 17, 20, 26, 28, 30, 33 (hochkant), 34, 39, 40, 42, 44 (flach), 47 (hochkant), 50 (hochkant), 54.

Diese Gruppe ist zahlenmäßig die größte der sechs möglichen Gruppen:

1	2	3	4	5	6
a	-	w	a	-	w
-	a	a	w	w	-
w	w	-	-	a	a

In diesem Schema bedeuten die Zeichen "-", "a", "w" die Indices der Geraden in den Diagrammen. Die Zugehörigkeit eines Versuches zu einer dieser Gruppen wurde wie folgt ermittelt: die Indices der drei zu einem Versuch gehörenden Geraden wurden so untereinander geschrieben, daß der Index der Geraden mit dem größten Steigungsmaß oben stand. Die beiden anderen Indices folgten dem kleiner werdenden Steigungsmaß der zu ihnen gehörenden Geraden entsprechend.

Es beweist die Richtigkeit der physikalischen Betrachtungen, daß die Gruppe 1 die meisten Versuchsergebnisse enthält. Bei den anderen Versuchen müssen irgendwelche bisher nicht berücksichtigten Faktoren das Ergebnis beeinflußt haben.

Im folgenden soll der Versuch unternommen werden, das unerwartete Ergebnis eines Teiles der Experimente zu erklären.

Bei der zweiten Gruppe ergibt sich eine Vergrößerung des Elastizitätsmoduls schon nach dem Ausschachten des Kanales.

Dieses Ergebnis kann durch Veränderungen des Dentins erklärt werden. Beim Ausschachten ist trotz aller Vorsichtsmaßnahmen durch Wärmeentwicklung das

Dentin ausgetrocknet worden. In die Porositäten wurde Bohrstaub einrotiert, der das Eindringen der physiologischen Kochsalzlösung verhinderte, so daß der frühere Feuchtigkeitsgehalt nicht wieder erreicht wurde.

Eine ähnliche Veränderung des Dentins beobachtet man ja auch beim Extrahieren altwurzelbehandelter Zähne; das Dentin ist hart und spröde geworden.

In den Versuchen ist diese Veränderung auf Entwässerung durch Wärmeentwicklung zurückzuführen, bei der Wurzelbehandlung sind Medikamente, vielleicht schon vorher Verfettung der Odontoblastenfortsätze für das Austrocknen verantwortlich zu machen.

Zur Gruppe 2 gehören die Versuche:

18, 19, 21, 23 (flach), 27, 29 (flach), 33 (flach), 37, 38 (hochkant), 45, 46 (flach), 47 (flach), 48, 49, 50 (flach), 51, 52.

Es handelt sich hier meist um starke Zähne, was eine unbemerkte Wärmeentwicklung erklärlich macht.

Bei der dritten Gruppe wird der Elastizitätsmodul bei jeder Meßreihe kleiner.

Dies ist der Fall bei:

1 (flach), 7, 8, 23 (hochkant), 25, 46 (hochkant).

Man muß hier wohl eine "Bahnung" annehmen. Das wiederholt deformierte Dentin verändert sich durch die mechanische Belastung. Kleine Haarrisse, vielleicht Risse vieler v. Ebner'scher Fibrillen würden diese Bahnung erklären.

Hier ist auch der Ort, eine Beobachtung zu vermerken, die an Eckzähnen gewonnen wurde:

Obwohl doch Eckzähne die stärksten Wurzeln aller Zähne besitzen, ergab sich bei ihnen häufig - bei 50% aller Eckzähne - ein auffällig kleiner Elastizitätsmodul. Trotzdem konnten sie ohne Fraktur sehr stark verformt werden. Diese Eigenschaft macht sie sehr geeignet zu ihrer Aufgabe, das "vordere Kiefergelenk" zu bilden. Diese Bezeichnung hat C. Hildebrandt den Eckzähnen gegeben. Er will damit ausdrücken, daß sie neben den Kiefergelenken maßgeblich an der Führung des Unterkiefers bei den Seit- und Vorwärtsbewegungen beteiligt sind.

Es scheint so, als ob das Dentin verschiedener Zähne sehr unterschiedliche Festigkeitswerte aufweise. Ja, selbst bei den Messungen an Eckzähnen mit verschiedenen Belastungsrichtungen unterschieden sich die Ergebnisse so, daß derselbe Zahn verschiedenen Gruppen zugeordnet werden mußte. Das ist durch eine richtungsabhängige Festigkeit des Dentins zu erklären, da ja bei den Messungen sonst gleiche Bedingungen vorlagen.

Diese Bahnung und die von der Richtung und vom Zahntyp abhängige Elastizität des Dentins wurde nicht näher untersucht. Sauer stellte hierüber bereits mechanische Untersuchungen an, histologische Untersuchungen könnten näheren Aufschluß bringen.

Beim vierten Typ von Meßergebnissen liegt die mit Wurzelstift gewonnene Gerade zwischen den beiden anderen und die mit ausgeschachtetem Kanal gewonnene am höchsten. Dies zeigt, daß die Festigkeit des unversehrten Zahnes nicht wieder erreicht werden konnte. Bahnung könnte die Ursache sein. Eine andere Erklärung wäre die, daß das Nickelin einen geringeren Elastizitätsmodul besitzt als das beim Ausschachten entfernte Dentin.

Da nur drei Versuche zu dieser Gruppe gehören, lassen sich nur schwer gemeinsame Merkmale der bei diesen Versuchen verwandten Zähne angeben. Es scheint sich um schwache Zähne zu handeln. Das spricht für die Gültigkeit der zweiten Erklärungsmöglichkeit: Beim Ausschachten wurde zuviel Dentin entfernt.

Gruppe 4: Versuch 35, 41, 53.

Bei der 5. Gruppe weist die vom unversehrten Zahn gewonnene Gerade das größte Steigungsmaß auf. Eine ungleichmäßige Verformung der Wurzel beim Belasten kann hier die Meßergebnisse beeinflusst haben. Die schwächste Stelle der Wurzel nach dem Ausschachten wird am Ende des erweiterten Kanales liegen. Der Kanaldurchmesser ist hier fast noch so wie am Eingang, der Wurzelumfang ist aber erheblich kleiner geworden. Tatsächlich treten auch an dieser Stelle am häufigsten Querfrakturen auf.

Auch die Durchbiegung wird hier am stärksten sein.

Wenn daher der Widerstand der Wurzel gegen das Durchbiegen nahe der Wurzelspitze schlagartig nachläßt, so wird sich hier ein Knick bilden. Da die gesamte Deformation der Wurzel an ihrer Spitze gemessen wird, kann ein solcher Knick, wenn er genügend weit von der Spitze entfernt auftritt, eine große Verbiegung vortäuschen.

Der Knick wird natürlich dann besonders in Erscheinung treten, wenn ein Teil der Wurzel durch den Wurzelstift verfestigt wird. Dann entsteht das völlig unerwartete Ergebnis, daß der Zahn mit ausgeschachtetem Kanal die größte Festigkeit aufweist, weil das Dentin, wie schon bei der 2. Gruppe, verfestigt wurde; nach Einfügen des Wurzelstiftes wurde aber durch den entstehenden Knick im unteren Wurzeldrittel ein geringer Elastizitätsmodul vorgetäuscht.

Zur 5. Gruppe gehören die Versuche:

29 (flach), 31, 38 (flach), 55.

Die 6. Gruppe besteht aus:

24, 32, 44 (hochkant).

Bei diesen beiden Gruppen findet man auffallend viele Eckzähne. Da sie die längsten Wurzeln aller Zähne besitzen, wird bei ihnen der erwähnte Knick in einiger Entfernung von der Wurzelspitze auftreten. Der lange Hebelarm bis zur Befestigungsstelle der anzeigenden Millernadel erklärt den offenbar großen Einfluß, den der Knick auf die Meßergebnisse ausübt.

Die 6. Gruppe besteht nur aus Eckzähnen. Das läßt einen zusätzlichen großen Einfluß der schon bei Gruppe 2 beschriebenen Dentinveränderungen erwarten und erklärt damit die Abweichungen vom errechneten Ergebnis der Messungen.

Diese Versuche, die Meßergebnisse zu interpretieren, zeigen, daß eine Reihe von anfangs unerwarteten Faktoren die Meßergebnisse beeinflussen. Je nach der Größe ihres Einflusses rufen sie die verschiedenen Variationen im Winkel der Geraden miteinander hervor.

Da das Ausmaß, in dem sie in den Meßvorgang eingreifen, nicht von vornherein abzusehen ist, berechtigt ihr Auftreten nachträglich die praktischen Experimente, obwohl doch aus der Festigkeitslehre einfache Ausdrücke bekannt sind, die von vornherein bestimmte Aussagen zulassen.

Gleichzeitig zeigen die Experimente die Grenzen der angegebenen Meßmethode. Unabhängig von Meßfehlern der Apparatur ergibt sich so eine Reihe von grundsätzlichen Problemen: die Inhomogenität des Dentins, die unregelmäßige Form der Wurzeln, die verschiedenen mechanischen Festigkeitswerte von Stift und Wurzel.

Wir sehen also auch bei den praktischen Messungen die schon anfangs erwähnten Unvollkommenheiten wieder auftreten, die durch die theoretischen Betrachtungen nicht berücksichtigt wurden.

Als Beweis dafür, daß die Meßgenauigkeit der Apparatur ausreichte und eine genauere Angabe der Deformationswerte keinen Sinn gehabt hätte, mag ebenfalls die Tatsache gelten, daß alle vorher erwarteten Meßprobleme in den Ergebnissen ihren Ausdruck gefunden haben.

VIII. ZUSAMMENFASSUNG

Die vorliegende Arbeit soll die Reihe derjenigen Arbeiten erweitern, die sich mit den elastischen Eigenschaften der Zähne, des Zahnhalteapparates und der Kiefer beschäftigen.

Es werden einige Arbeiten angeführt, die schon vor längerer Zeit auf elastische Deformationen im menschlichen und tierischen Gebiß aufmerksam machten. Es folgt eine Reihe von Arbeiten, die in den letzten 10 Jahren dieses Thema behandelten. Diese Arbeit schließt sich an eine Folge von Dissertationen an, die aus der Johannes Gutenberg-Universität zu Mainz stammen.

Zunächst werden die Verhältnisse geschildert, die im unversehrten Gebiß zu elastischen Deformationen führen. Ihre Wirkungen werden nach den Ergebnissen einiger neuerer Arbeiten beschrieben.

Die Frage, ob durch zahnärztliche Maßnahmen, besonders das Einführen einer Stiftverankerung, dieses wohlausgewogene System elastischer Verformungsmöglichkeiten verändert wird, leitet zum eigentlichen Thema über.

Die physikalischen Grundlagen und Definitionen der elastischen Deformationen werden behandelt. Dabei wird schon die Frage erörtert, ob eine Veränderung der Struktur des Zahnes, wie sie in der zahnärztlichen Praxis üblich ist, wohl zu starken Veränderungen des elastischen Verhaltens führen wird. Es ist nach der mathematischen Behandlung des Problems nicht zu erwarten, weil der Radius des Wurzelstiftes klein ist und noch dazu in seiner 4. Potenz in den entsprechenden Ausdruck eingeht.

In Wirklichkeit sind einige Voraussetzungen, die beim Entwickeln des oben erwähnten Ausdrucks angenommen wurden, nicht erfüllt. Das Experiment muß entscheiden, ob sie in der theoretischen Betrachtung zu Recht unberücksichtigt blieben.

Bei der nun folgenden Beschreibung der Versuche werden zunächst die Gesichtspunkte angeführt, nach denen die zu den Versuchen benutzten Zähne ausgewählt wurde. Ihre Behandlung vor und zwischen den Messungen wird beschrieben. Es wird Wert darauf gelegt, die mechanischen Eigenschaften der Zähne nach der Extraktion möglichst wenig zu verändern.

Eine Betrachtung, welche der in vivo auf den Zahn einwirkenden Kräfte interessant im Sinne der gestellten Aufgabe und daher nachahmenswert ist, eröffnet die Beschreibung der Meßapparatur.

Eine vorhandene Apparatur wurde in wesentlichen Teilen abgeändert. Die An-

derungen werden beschrieben und ihre Notwendigkeit begründet.

Genauere Beschreibungen der Meßvorrichtung und ihrer Fehlergrenzen sollen die hervorragende Bedeutung dieses Teiles der Anlage unterstreichen.

Es folgen einige Fehlerquellen und die Maßnahmen, die ihren Einfluß auf die Meßergebnisse verringern sollen. Hierbei wurde besonders die Einspannvorrichtung betrachtet, die bei der Kleinheit der Meßobjekte sehr problematisch ist; auch einige Versuche, die zu der endgültigen Form geführt haben, werden erwähnt.

Auch andere Möglichkeiten, die Deformationen zu messen, werden beschrieben.

Die Belastungsvorrichtung wird erklärt und der etwas größere Aufwand, der getrieben wurde, begründet.

Nun folgen Tabellen und graphische Darstellungen, die nach den durchgeführten Messungen gewonnen wurden.

Ein Kommentar zu diesen Messungen enthält besonders Bemerkungen über ihre Zuverlässigkeit und praktische Brauchbarkeit und die Feststellung, daß durch das Einfügen eines Wurzelstiftes nach vorherigem Aufbereiten des Kanales keine wesentliche Änderung im elastischen Verhalten des Zahnes hervorgerufen wird, eine Feststellung, die mit den theoretischen und vor allem auch klinischen Erfahrungen übereinstimmt.

Die einzelnen Versuchsergebnisse werden dann untersucht. Die meisten Versuche zeigen das erwartete Resultat. Ein kleinerer Teil weicht jedoch davon ab. Diese Versuche werden in 5 Gruppen eingeteilt. Der Versuch wird unternommen, die jeder Gruppe gemeinsame Abweichung vom vorhergesagten Ergebnis zu erklären. Beim Betrachten, welche Zähne jeweils nach dem Versuchsergebnis zu einer Gruppe zusammengefaßt wurden, kommt man zu gemeinsamen Eigenschaften der Zähne innerhalb einer Gruppe. Es sind im einen Fall sehr starke Zähne, im anderen besonders schwache, wieder in einem anderen Fall lange Zähne, die eine Gruppe bilden. Auch mehrere gemeinsame Eigenschaften gleichzeitig kommen vor.

Einige Nebenfunde, die während der Messungen erhoben wurden, aber nicht unmittelbar zum Thema der Arbeit gehören, konnten eingeflochten werden.

Zum Schluß wird untersucht, ob die Faktoren, die für die Abweichungen der Meßergebnisse vom erwarteten Resultat verantwortlich zu machen sind, auf

Besonderheiten der Methode oder der Meßkörper zurückzuführen sind. Es stellt sich heraus, daß sich tatsächlich alle unerwarteten Resultate erklären lassen durch Besonderheiten, die den idealen Fall vom praktischen Versuch unterscheiden.

Damit dürften die Gültigkeit der theoretischen Behandlung des Themas und die Richtigkeit der praktischen Messungen bestätigt sein.

LITERATURHINWEISE

- | | |
|-----------------|---|
| Black, G. V. | Konservierende Zahnheilkunde, Bd. II |
| Bredau, G. | Messung der physiologischen Zahnbeweglichkeit der oberen Seitenzähne unter Berücksichtigung der elastischen Deformierbarkeit der oberen seitlichen Alveolarfortsätze im gesunden Gebiß.
Inaug. Diss. Mainz |
| Driak, Fr. | Über die Elastizität des Dentins.
Z.f.Stom. 32, S. 1421 |
| Fick | Auf Seite 1 zitiert nach einer mündlichen Information von Jung. |
| Gebhardt, W. | Über den funktionellen Bau einiger Zähne.
Archiv für Entwicklungsmechanik der Organismen, Bd. X, 1900 |
| Gettmann, H. | Über die Elastizität der kindlichen Mandibula bei der Bißöffnungsbewegung.
Inaug. Diss. Mainz, 1951. |
| Hiltebrandt, C. | Die Arbeitsphysiologie des menschlichen Kauorganes.
Werk-Verl. Dr. E. Banaschewski, Bad Wörishofen, 1950 |
| Issel, P. | Stiftkronenersatz im Frontzahngebiet.
D. z. W. 1938
Grundsätzliches und Praktisches zur Verankerung der Stiftkrone im Frontzahngebiet des Oberkiefers.
DZZ 1950 |
| Job, D. K. | Über die Elastizität der Skeletteile des Gebißsystems bei der mastikatorischen Funktion.
Inaug. Diss. Mainz 1951 |
| Jung, Fr. | Die Elastizität der Mandibula bei der Bißöffnungsbewegung.
Habilitationsschrift, Mainz 1949
Die Elastizität der Skeletteile der Manibula.
Mainz 1949 |

- Katz, A. Vergleichende Betrachtungen verschiedener Arten von Zähnen und Verankerungsmitteln nach mechanischen Gesichtspunkten.
D. M. f. Z. 1929
- Klötzer, W. Über die elastische Deformation der Brücken-zwischenglieder.
ZWR 61/1 und 2, 1960, S. 13
- Mühlemann, H. R. Die physiologische und pathologische Zahnbe-weglichkeit.
Schw. M. f. Zhk. Bd. 61/51, H. 1
- Pohl, R. W. Mechanik, Akustik und Wärmelehre.
Springer-Verlag, Berlin und Göttingen, 10. u. 11. Aufl. 1947
- Preisseecker Über den Halt von Gußfüllungen und gegossenen Wurzelstiften.
Z. f. Stom. 1935
- Rauber Elastizität und Festigkeit des Knochens.
Leipzig 1867
- Saalfrank, K. Über die Elastizität des Kieferknochens in Abhän-gigkeit von dem Funktionszustand des Gebißsystems.
Inaug. Diss. Mainz 1955
- Schmitt, P. H. Experimentelle Studien über die Biegefähigkeit defekter Prämolaren- und Molarenkronen.
Inaug. Diss. Mainz 1956
- Schuster, H. O. Untersuchungen über die physiologische und patho-logische Beweglichkeit der unteren Frontzähne in und mit den Alveolen.
Inaug. Diss. Mainz 1953
- Sieglaß, M. Untersuchungen über die physiologische und patho-logische Beweglichkeit der oberen Seitenzähne in anomalen Gebißsystemen.
Inaug. Diss. Mainz 1954
- Steiger Betrachtungen über die Funktion des Wurzelstiftes.
Schw. V. f. Zhk., Bd. XXXI, 1919, S. 1

Zum Schluß der Arbeit möchte ich Herrn Professor Dr. Fr. Jung herzlich danken für die Überlassung des Themas. Seine allzeit gezeigte Hilfsbereitschaft hat mir die Durchführung der Arbeit wesentlich erleichtert.

Auch allen denen, die mir in Diskussionen mit gutem Rat und wohlwollender Kritik zur Seite gestanden haben, sei an dieser Stelle gedankt.

Den Instituten für Mineralogie, Physik und Physiologie und ihren Herren Direktoren, Professor Dr. E. Bayer, Professor Dr. Klump und Professor Dr. H. Schriever, sei für die leihweise Überlassung wichtiger Teile der Meßapparatur auch im Namen der Klinik und Poliklinik für Zahn-, Mund- und Kieferkrankheiten gedankt.

Nicht vergessen möchte ich den Mechaniker des Institutes für Mineralogie, Herrn Wagner, weil er immer mit Sachkenntnis und viel Zeitaufwand beim Umbau der Apparatur zur Verfügung stand.

LEBENS LAUF

Ich wurde am 19. Juli 1930 als Sohn des Zahnarztes Dr. Arthur Wenzel und seiner Ehefrau Gertrude, geb. Winzer, in Duisburg-Hamborn geboren.

Ab Ostern 1937 besuchte ich die Grundschule in Duisburg-Hamborn, im Herbst 1941 kam ich in die Sexta der damaligen Schlageter-Oberschule für Jungen in Duisburg-Hamborn. Nach Besuch dieser Schule und des Städt. Gymnasiums für Jungen in Hann.-Münden legte ich im März 1951 die Reifeprüfung an der Leibniz-Schule, Naturwissenschaftl. Gymnasium, in Duisburg-Hamborn ab. Ich studierte vom SS 1951 bis WS 1954/55 an der Westf. Wilhelms-Universität in Münster Physik, wechselte dann aber das Studienfach.

Im SS 1955 studierte ich in Münster, im WS 1955/56 in Tübingen, ab SS 1956 an der Johannes Gutenberg-Universität zu Mainz Zahnheilkunde. Nach dem WS 1956/57 bestand ich in Mainz die zahnärztliche Vorprüfung, am 10.12. 1959 beendete ich die zahnärztliche Hauptprüfung vor dem Prüfungsausschuß in Mainz.

Seither habe ich als Zahnarzt in der väterlichen Praxis und an der Klinik und Poliklinik für Zahn-, Mund- und Kieferkrankheiten gearbeitet.

